



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

TESIS DOCTORAL

Desarrollo de nuevas metodologías de inspección del sistema de dirección de vehículos mediante placa alineadora

Autor:

D. Manuel Pérez Rey

Directores:

Dra. Dña. María Jesús López Boada

Dr. D. Daniel García-Pozuelo Ramos

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Leganés, octubre de 2011

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE NUEVAS METODOLOGÍAS DE INSPECCIÓN DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN DE VEHÍCULOS MEDIANTE PLACA ALINEADORA

Autor: D. Manuel Pérez Rey

Directores: Dra. Dña. María Jesús López Boada
Dr. D. Daniel García-Pozuelo Ramos

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente: (Nombre y apellidos)

Vocal: (Nombre y apellidos)

Vocal: (Nombre y apellidos)

Vocal: (Nombre y apellidos)

Secretario: (Nombre y apellidos)

Calificación:

Leganés, de de

A mis padres

*Out on the ocean, sailing away,
I can hardly wait to see you come of age
But I guess we'll both just have to be patient.
'Cause it's a long way to go, a hard row to hoe,
Yes, it's a long way to go but in the meantime,*

*Before you cross the street, take my hand,
Life is what happens to you
While you're busy making other plans.*

Beautiful, beautiful, beautiful, beautiful boy.

John Lennon, *Beautiful Boy (Darling Boy)*

Agradecimientos

De mis abuelos conservo algunas de las enseñanzas más importantes de mi vida; por ejemplo, que *de bien nacidos es ser agradecidos*. En memoria de su sabiduría, debo comenzar esta tesis agradeciendo a todos aquellos que han tomado parte en la realización de la misma.

En primer lugar, a mis directores de tesis, los doctores María Jesús López Boada y Daniel García-Pozuelo Ramos, por guiarme tan acertadamente durante este tiempo hasta conseguir que hoy pueda presentarla.

Al Dr. Vicente Díaz, por haberme facilitado mi experiencia laboral en el mundo de la docencia y la investigación en la Universidad Carlos III.

A mis compañeros del Departamento de Ingeniería Mecánica, especialmente a la Dra. Beatriz López Boada por sus valiosas aportaciones a esta tesis.

Al margen del entorno más próximo a la tesis, que es la Universidad, para mí es fundamental la presencia y el apoyo de otras personas, imprescindibles para ayudarme a seguir adelante.

Al cabo de las cincuenta y pico mil palabras que componen este documento, necesitaría al menos otras tantas para agradecer suficientemente todo lo que debo a mis padres, las personas a las que más admiro. Así que para no sobredimensionar este apartado, tendré que limitarme a darles las gracias por solo un par de cosas como resumen: por haberme dado la infancia más feliz que se pueda imaginar (espero ser con Diego, y su hermanito que está en camino, la centésima parte de buen padre que ellos). Y por hacer que mi vida sea infinitamente más fácil que la suya, apoyándose siempre en los caminos que he ido tomando, a pesar de no seguir sus consejos, con los que reconozco que nos habría ido mucho mejor.

A mis abuelos, que tanto lucharon, trabajaron y se sacrificaron, con la ilusión de que sus hijos y su nieto pudieran tener los estudios a los que ellos ni siquiera tuvieron la oportunidad de aspirar y, con ello, una vida mejor. Aunque por desgracia alguno de ellos no llegó a verlo, ya en su momento mis padres alcanzaron el máximo nivel de formación académica, al que pretendo unirle ahora yo, con lo que creo que mis abuelos se darían por satisfechos y les llenaría de orgullo. Tanto

ellos como mis padres (que han seguido luchando, trabajando y sacrificándose por su vástago) serán siempre para mí el ejemplo a seguir, y sus valores, mi referente.

A mis tíos, José Luis y María Ángeles, por aconsejarme desde su experiencia lo mejor para mí, como si fuera hijo suyo. También reconozco que, de haberles hecho caso, me habría ido mucho mejor.

A Sabine, por seguir aguantándome tras estos once años.

A mis Amigos (con mayúsculas): Adrián, Conrado, Daniel y Sergio, por seguir aguantándome etapa tras etapa de nuestras vidas.

A mi jefe en DAF Vehículos Industriales, el Dr. Jesús González Mamano, por todo lo que me ha enseñado, no solo sobre vehículos.

A la sociedad en su conjunto, por financiar mis estudios y mi investigación a través de la Universidad y las distintas Administraciones con competencias en este campo, financiación que espero devolver con creces contribuyendo con los resultados de mi actividad docente e investigadora a hacer más fácil la vida de los demás.

Resumen

La principal contribución de la presente tesis doctoral consiste en el desarrollo de una propuesta de tres nuevas metodologías de inspección del sistema de dirección de vehículos de tipo turismo en la Inspección Técnica de Vehículos, mediante la utilización de la placa alineadora, alternativas al actual procedimiento.

Dentro de los trabajos a realizar previamente para obtener este resultado, varios de los cuales constituyen aportaciones originales de la tesis, se ha revisado el estado del arte y el estado de la técnica en materia de inspección de la alineación de vehículos. Dicha revisión ha arrojado la conclusión de que, a pesar del extenso uso de la placa alineadora, no se está utilizando todo el potencial disponible con este dispositivo, ya que no se emplea por sí misma para establecer un criterio de aceptación o rechazo de un vehículo en la inspección.

Se ha analizado en profundidad el fundamento de la medida con placa alineadora, permitiendo obtener las bases para los criterios a desarrollar.

Igualmente, se ha estudiado la influencia que los distintos parámetros pudieran tener en la desviación lateral medida con la placa alineadora, concluyendo que esta medida es prácticamente independiente de cualquier factor, a excepción del ángulo de convergencia total del eje medido. Este hallazgo ha permitido desarrollar un modelo para calcular la desviación lateral que produce un determinado ángulo de convergencia.

Las tres nuevas metodologías propuestas abordan el problema de la inspección desde distintas perspectivas, según el criterio del sistema de dirección que se quiera garantizar. Así, una de ellas propone comprobar si el ángulo de convergencia se ajusta a las recomendaciones del fabricante. Otra, que el vehículo mantenga una capacidad suficiente para realizar una maniobra exigente en cuanto a sollicitaciones del neumático. La última pretende garantizar unos límites absolutos para la magnitud de la desviación lateral. Esta última propuesta se ha elegido finalmente como la más adecuada para una aplicación inmediata en las estaciones de inspección mediante la placa alineadora, que es el dispositivo de medida existente actualmente en todas ellas.

La base experimental necesaria para el estudio del funcionamiento y factores que influyen en la medida con placa alineadora, así como para la validación de las tres nuevas metodologías propuestas, ha consistido en la medida de la alineación y el ensayo de desviación y fuerza laterales para una muestra significativa del parque de turismos.

Abstract

This thesis' main contribution is the proposal of three new methodologies for the vehicles' steering system inspection in the context of the Periodic Technical Inspection, alternatives to the current procedure, making use of the sideslip tester.

Some of the works that had to be previously undertaken are original contributions.

The state of the art has leaded to the conclusion that, although its spread use, the sideslip tester is not providing all of its potential, as it is not employed by itself as a criterion to accept or reject a vehicle in the inspection.

The device's measuring principles have been studied in deep, providing the basis for the criteria to develop.

It has also been studied the possible influence that different factors could have on the sideslip measurement, concluding that this measurement is almost independent from any other factor a part from the axle's total toe-in angle. This has, in turn, allowed developing a model of the relationship between these two magnitudes.

The three new methodologies proposed approach the inspection from different angles, depending on the steering system aspect to guarantee. Thus, one of them tries to check if the toe-in angle is set in accordance to the manufacturer's recommendations. Another one seeks if the vehicles keeps enough capacity to carry on a demanding maneuver. The last proposal establishes absolute sideslip limits. This last one has been chosen as the most adequate to be applied in the PTI stations in a short term.

The experimental basis needed for the study of the measuring principles and the factors influencing the sideslip measurement, as well as to validate the three new proposals, has consisted on the steering alignment measurement, and on the sideslip and side force measurement, for a significant sample of the vehicle's fleet.

Índice

	Página
RESUMEN	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XV
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	3
CAPÍTULO 2 ESTADO DEL ARTE	5
2.1 NORMATIVA SOBRE AUTOMÓVILES	5
2.1.1 REGLAMENTACIÓN GENERAL	6
2.1.2 LA ITV Y SU INFLUENCIA EN LA SEGURIDAD VIAL	8
2.1.3 NORMATIVA ESPECÍFICA DE INSPECCIÓN.....	10
2.1.3.1 Reglamentación internacional.....	10
2.1.3.2 Reglamentación española.....	13
2.2 SISTEMA DE DIRECCIÓN	14
2.2.1 GEOMETRÍA DE LA DIRECCIÓN	15
2.2.1.1 Ángulo de caída	17
2.2.1.2 Ángulo de salida.....	20
2.2.1.3 Ángulo de avance.....	21
2.2.1.4 Ángulo de deriva o deslizamiento	22
2.2.1.5 Ángulo de convergencia.....	23

2.2.2	IMPLICACIONES DE LOS DESARROLLOS TECNOLÓGICOS RECIENTES	28
2.2.3	CONSECUENCIAS DE LA DIRECCIÓN EN MAL ESTADO	30
2.2.4	RELACIÓN CON EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN	34
2.3	INTERACCIÓN ENTRE NEUMÁTICO Y SUELO	36
2.3.1	HUELLA DE CONTACTO	37
2.3.2	MECANISMOS DE PRODUCCIÓN DE FUERZA EN EL NEUMÁTICO	39
2.3.2.1	Fuerza y deslizamiento longitudinales.....	40
2.3.2.2	Fuerza lateral y deriva.....	41
2.4	INSPECCIÓN DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN	43
2.4.1	MEDIDORES DE ÁNGULOS CONVENCIONALES	43
2.4.2	MEDIDORES DE ÁNGULOS 3D	45
2.4.3	PLACA DINAMOMÉTRICA.....	47
2.4.4	MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO LATERAL	48
2.4.4.1	Medidor de rodillos	48
2.4.4.2	Placa alineadora convencional.....	50
CAPÍTULO 3	OBJETIVOS	55
CAPÍTULO 4	FUNCIONAMIENTO DE LA PLACA ALINEADORA	57
4.1	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS.....	57
4.1.1	DETALLES CONSTRUCTIVOS	58
4.1.2	MUELLES DE CENTRADO	60
4.1.3	CARACTERIZACIÓN DE LA RELACIÓN FUERZA-DESPLAZAMIENTO LATERAL	63
4.1.4	PLACA DE RELAJACIÓN O COMPENSACIÓN	65
4.2	OBTENCIÓN DE LA DESVIACIÓN LATERAL.....	67
4.3	ESTUDIO DE LAS TRAYECTORIAS DE LAS RUEDAS	70
CAPÍTULO 5	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DESVIACIÓN LATERAL.....	79
5.1	INSTRUMENTACIÓN EMPLEADA.....	80
5.1.1	CALIBRACIÓN	81
5.1.2	VEHÍCULOS ENSAYADOS.....	84
5.2	DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	85
5.3	METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES	90
5.4	INFLUENCIA DE LOS DISTINTOS PARÁMETROS EN LA DESVIACIÓN LATERAL...	93

5.4.1	INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA	93
5.4.2	INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE PASO	95
5.4.3	INFLUENCIA DE LA SUPERFICIE DE RODADURA	96
5.4.4	INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE CAÍDA	97
5.4.5	INFLUENCIA DE LA PRESIÓN	100
5.4.6	INFLUENCIA DEL NEUMÁTICO	102
5.4.7	INFLUENCIA DE LA MASA DEL VEHÍCULO	103
5.4.8	RELACIÓN ENTRE ÁNGULO DE CONVERGENCIA Y DESVIACIÓN LATERAL	109

CAPÍTULO 6 RELACIÓN ENTRE PLACA ALINEADORA CONVENCIONAL Y PLACA DINAMOMÉTRICA..... 117

6.1	RELACIÓN ALINEACIÓN-FUERZA LATERAL.....	120
6.1.1	INFLUENCIA DE LOS DISTINTOS PARÁMETROS EN LA FUERZA LATERAL.	120
6.1.2	DIFERENCIAS CON LA MEDIDA CON PLACA ALINEADORA	128
6.1.3	MODELO DE FUERZA LATERAL	129
6.2	RELACIÓN ENTRE LAS MEDIDAS CON PLACA ALINEADORA Y CON PLACA DINAMOMÉTRICA	130

CAPÍTULO 7 PROPUESTAS DE MEJORA EN LA INSPECCIÓN DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN 137

7.1	CRITERIOS EXISTENTES	138
7.2	PROPUESTA I: CRITERIO BASADO EN EL ÁNGULO DE CONVERGENCIA RECOMENDADO POR EL FABRICANTE	144
7.2.1	PLANTEAMIENTO DEL LÍMITE DE RECHAZO	145
7.2.2	ENSAYOS DE VALIDACIÓN.....	149
7.3	PROPUESTA II: CRITERIO BASADO EN LA ADHERENCIA DETRAÍDA POR EL ÁNGULO DE CONVERGENCIA	152
7.3.1	PLANTEAMIENTO DEL LÍMITE DE RECHAZO	153
7.3.2	ENSAYOS DE VALIDACIÓN.....	156
7.4	PROPUESTA III: CRITERIO UNIVERSAL BASADO EN DESVIACIÓN LATERAL....	158
7.4.1	VALORES HABITUALES DE ALINEACIÓN.....	159
7.4.2	PLANTEAMIENTO DEL LÍMITE DE RECHAZO	161
7.4.3	ENSAYOS DE VALIDACIÓN.....	168
7.5	COMPARATIVA DE LOS CRITERIOS PROPUESTOS.....	170

CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS	175
8.1 CONCLUSIONES	175
8.2 DESARROLLOS FUTUROS.....	179
ANEXOS	183
ANEXO I: SISTEMA DE REFERENCIA SAE	185
ANEXO II: DATOS OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES.....	187
BIBLIOGRAFÍA	199

Índice de Figuras

	Página
<i>Figura 2.1 Ángulo de caída.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.2 Motoniveladora compensando fuerza lateral (Fuente: John Deere).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.3 Ensanchamiento del ancho de vía efectivo, debido a un ángulo de caída negativo</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.4 Ángulo de salida δ (AENOR, 1987).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.5 Ángulo de avance β (AENOR, 1987).....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.6 Ángulo de deriva α^*, vista en planta</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.7 Ángulo de convergencia α, vista en planta.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2.8 Signo de la convergencia, vista de planta</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2.9 Efecto de la propulsión sobre el ángulo de convergencia del eje delantero, vista de planta (Reimpell, Stoll & Betzler, 2000b).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.10 Mecanismo de dirección del prototipo Mercedes F400 (Fuente: Mercedes-Benz)</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.11 Neumático desgastado con reventón</i>	<i>32</i>
<i>Figura 2.12 Fuerzas en el neumático</i>	<i>36</i>
<i>Figura 2.13 Huella de contacto de uno de los neumáticos empleados.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 2.14 Huellas de contacto para distintos neumáticos (Reimpell, Stoll & Betzler, 2000a)</i>	<i>38</i>
<i>Figura 2.15 Elipse de adherencia.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 2.16 Deformación de la zona de contacto neumático-suelo (Gillespie, 1992).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 2.17 Medidor de ángulos convencional.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 2.18 Medidor de ángulos 3D Hunter DSP600</i>	<i>45</i>
<i>Figura 2.19 Detalle de la diana del medidor Hunter DSP600</i>	<i>45</i>
<i>Figura 2.20 Medidor de ángulos Bepco NCA-200.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 2.21 Robot de ajuste de convergencia Bepco Probo</i>	<i>46</i>
<i>Figura 2.22 Medidor de rodillos (Nozaki, 2006)</i>	<i>49</i>
<i>Figura 2.23 Utilización de placa alineadora en ITV.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 2.24 Esquema de la patente original de R.L. Skinner (Skinner, 1924)</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2.25 Esquema de la patente de H.E. Musselman (Musselman, 1934).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 2.26 Alineador al paso de la década de 1960 (Fuente: The Rotarian).....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.1 Placa alineadora utilizada en los ensayos.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.2 Esquema de la placa alineadora</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.3 Mecanismo interno de una placa alineadora</i>	<i>59</i>
<i>Figura 4.4 Detalle del sensor de proximidad inductivo</i>	<i>60</i>

<i>Figura 4.5 Curva característica del sensor de la placa alineadora (Fuente: Telemecanique)</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.6 Uno de los dos muelles de centrado de la placa alineadora.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.7 Relación fuerza-elongación del muelle.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.8 Curva característica Fuerza-Desplazamiento</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4.9 Medida de desplazamiento lateral con y sin placa de relajación.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4.10 Serie de repeticiones de un ensayo de medida de desplazamiento.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.11 Esquema de medida de desplazamiento con placa alineadora.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 4.12 Procedimiento de registro de las trayectorias.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4.13 Desplazamiento Caso 1: convergencia 1,25° en rueda de placa</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.14 Registro de desplazamiento de la placa de medida para el primer caso estudiado</i>	<i>73</i>
<i>Figura 4.15 Desplazamiento Caso 2: convergencia 1,25° en la rueda opuesta</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.16 Desplazamiento Caso 3: convergencia total 1,25°, repartida en ambas ruedas.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4.17 Desplazamiento entre rueda y placa, y placa y suelo fijo.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.18 Anulación del efecto de convergencias de distinto signo (con volante fijo).....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.1 Placa dinamométrica utilizada.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 5.2 Útil de calibración de placa alineadora</i>	<i>82</i>
<i>Figura 5.3 Comparativa de ajustes de calibración.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 5.4 Esquema de combinaciones de variables de la fase sistemática</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5.5 Barra de acoplamiento de la dirección</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5.6 Esquema de la metodología seguida para los ensayos.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 5.7 Línea ITV utilizada para los ensayos.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.8 Calentador de neumáticos utilizado en los ensayos.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.9 Efecto de la temperatura en la fuerza lateral. Neumáticos I, $\alpha=3^\circ$, $P=2$ bar, $m=1135$ kg</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.10 Realización del ensayo con una capa de aceite interpuesta.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5.11 Medida de fuerza lateral con una capa de aceite interpuesta.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5.12 Desviación lateral en función de convergencia para distintas presiones. Neumáticos I, $m=1135$ kg.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5.13 Desviación lateral en función de convergencia para distintas presiones. Neumáticos II, $m=1135$ kg.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 5.14 Desviación lateral en función de la presión para distintas convergencias. Neumáticos I, $m=1135$ kg.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 5.15 Desviación lateral en función de la presión para distintas convergencias. Neumáticos II, $m=1135$ kg.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.16 Desviación lateral en función de convergencia para distintos neumáticos. $P=2$ bar....</i>	<i>103</i>

<i>Figura 5.17 Variación de la vía delantera de un vehículo en función de la masa soportada (Reimpell, Stoll & Betzler, 2000b).....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 5.18 Cambio del ángulo de convergencia con el recorrido de la suspensión (Haney, 2003) .</i>	<i>105</i>
<i>Figura 5.19 Desviación lateral en función de la masa para distintas convergencias iniciales. Neumáticos I, P=2 bar.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 5.20 Desviación lateral en función de la masa para distintas convergencias iniciales. Neumáticos II, P=2 bar.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 5.21 Desviación lateral en función de convergencia para distintas masas totales. Neumáticos I, P=2 bar.....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 5.22 Desviación lateral en función de convergencia para distintas masas totales. Neumáticos II, P=2 bar</i>	<i>108</i>
<i>Figura 5.23 Conjunto de datos de los ensayos y ajuste mediante el modelo propuesto</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5.24 Diferencia entre datos experimentales y modelo de desviación lateral.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 5.25 Relación entre convergencia medida y estimada</i>	<i>115</i>
<i>Figura 6.1 Placa dinamométrica utilizada.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 6.2 Medida de fuerza lateral (Neumáticos II, $\alpha=-1^\circ$, P=2 bar, m= 1260 kg).....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 6.3 Esquema de instalación de placa dinamométrica.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 6.4 Fuerza lateral en función de convergencia. P=2 bar, m=1260 kg</i>	<i>121</i>
<i>Figura 6.5 Fuerza lateral en función de la masa para distintas convergencias iniciales. Neumáticos I, P=2 bar</i>	<i>122</i>
<i>Figura 6.6 Fuerza lateral en función de la masa para distintas convergencias iniciales. Neumáticos II, P=2 bar</i>	<i>122</i>
<i>Figura 6.7 Fuerza lateral en función de convergencia para distintas masas totales. Neumáticos I, P=2 bar</i>	<i>123</i>
<i>Figura 6.8 Fuerza lateral en función de convergencia para distintas masas totales. Neumáticos II, P=2 bar</i>	<i>124</i>
<i>Figura 6.9 Influencia del neumático en la relación entre convergencia y fuerza lateral. P=2 bar ..</i>	<i>125</i>
<i>Figura 6.10 Fuerza lateral en función de la presión para distintas convergencias. Neumáticos II, m=1135 kg.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 6.11 Fuerza lateral en función de convergencia para distintas presiones. Neumáticos II, m=1135 kg.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 6.12 Efecto del ángulo de caída sobre la fuerza lateral.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 6.13 Fuerza lateral medida en placa dinamométrica, en función de desviación lateral medida en placa alineadora.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 6.14 Relación entre fuerzas laterales en placa dinamométrica y alineadora. P= 2 bar</i>	<i>133</i>
<i>Figura 6.15 Relación entre las fuerzas medidas en placa dinamométrica y alineadora</i>	<i>135</i>

<i>Figura 7.1 Criterio I de calificación de defectos</i>	<i>148</i>
<i>Figura 7.2 Criterio de inspección basado en adherencia (García-Pozuelo, Díaz & Boada, 2010)....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 7.3 Esquema resumen del criterio basado en la adherencia lateral.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 7.4 Alternativa para la obtención de la adherencia lateral.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 7.5 Distribución estadística de convergencias según Xu (Xu & Qiao, 2005)</i>	<i>160</i>
<i>Figura 7.6 Rango de convergencias recomendadas.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 7.7 Desgastes típicos por incorrecta alineación</i>	<i>164</i>
<i>Figura 8.1 Esquema de las fases seguidas en la realización de la tesis.....</i>	<i>176</i>
<i>Figura 8.2 Posible diseño de maqueta de ensayos</i>	<i>180</i>
<i>Figura A.1 Sistema de referencia SAE.....</i>	<i>185</i>
<i>Figura A.2 Radio de rodadura (AENOR, 1987).....</i>	<i>186</i>

Índice de Tablas

	Página
<i>Tabla 4-1 Cálculo de la constante elástica de los muelles</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 4-2 Conjunto de repeticiones de distintos ensayos de desplazamiento lateral en placa alineadora</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 5-1 Comparativa de ajuste de las curvas de calibración.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabla 5-2 Ángulos de alineación recomendados para el vehículo ensayado.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 5-3 Rangos de variación de las variables para los ensayos sistemáticos.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 5-4 Influencia de la velocidad sobre la medida de desviación lateral. Neumático I, P=2 bar, m=1135 kg.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 5-5 Variación del ángulo de convergencia en función de la masa adicional.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabla 5-6 Diferencias en el cálculo de la desviación lateral según las distintas ecuaciones propuestas</i>	<i>114</i>
<i>Tabla 5-7 Ensayos de validación del modelo de desviación lateral propuesto.....</i>	<i>115</i>
<i>Tabla 7-1 Extracto de la recomendación (CEPE/ONU, 1998b).....</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 7-2 Extracto de la recomendación (C.I.T.A., 1996).....</i>	<i>139</i>
<i>Tabla 7-3 Resultado de aplicación de un límite de ± 10 m/km</i>	<i>142</i>
<i>Tabla 7-4 Muestra de ensayos de validación de la Propuesta I de criterio de inspección</i>	<i>150</i>
<i>Tabla 7-5 Resumen conjunto ensayos Criterio I.....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 7-6 Muestra de ensayos de validación de la Propuesta II de criterio de inspección</i>	<i>157</i>
<i>Tabla 7-7 Resumen conjunto ensayos Criterio II.....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 7-8 Comparación con los límites propuestos por García-Pozuelo.....</i>	<i>165</i>
<i>Tabla 7-9 Ensayos de validación de la Propuesta III de criterio de inspección</i>	<i>168</i>
<i>Tabla 7-10 Resumen conjunto ensayos Criterio III.....</i>	<i>169</i>
<i>Tabla 7-11 Resumen resultados inspección</i>	<i>170</i>
<i>Tabla A-1 Ensayos de validación de la Propuesta I de criterio de inspección.....</i>	<i>187</i>
<i>Tabla A-2 Ensayos de validación de la Propuesta II de criterio de inspección</i>	<i>190</i>
<i>Tabla A-3 Ensayos de validación de la Propuesta III de criterio de inspección</i>	<i>192</i>
<i>Tabla A-4 Comparativa de los ensayos de validación según las tres propuestas realizadas.....</i>	<i>195</i>

Lista de símbolos

d_l	Desplazamiento lateral de la placa alineadora
D_l	Desviación lateral
F_x	Fuerza longitudinal en el contacto neumático-suelo
F_y	Fuerza lateral en el contacto neumático-suelo
F_z	Fuerza vertical en el contacto neumático-suelo
K_m	Constante elástica de un muelle
m	Masa del vehículo
M_y	Momento de resistencia a la rodadura
M_z	Momento autoalineante
P	Presión de inflado del neumático
R_R	Fuerza de resistencia a la rodadura
α	Ángulo de convergencia
α^*	Ángulo de deriva
β	Ángulo de avance
γ	Ángulo de caída
δ	Ángulo de salida
μ_y	Adherencia lateral solicitada

Capítulo 1 Introducción

En la actualidad existe una creciente concienciación sobre la necesidad de reducir en la mayor medida posible los accidentes de tráfico, por las inaceptables pérdidas humanas y económicas que estos ocasionan, cuantificadas en 1,3 millones de personas fallecidas y 50 millones de heridos o parálíticos al año en el mundo, con un coste de hasta el 3% del PIB (O.M.S., 2011). Se puede contribuir a mejorar la seguridad vial actuando sobre cualquiera de los elementos que constituyen el sistema de tráfico: los conductores, la carretera, o el propio vehículo. Por ejemplo, una de las vías para reducir la probabilidad de accidente debido a fallo mecánico en el vehículo consiste en la ejecución de programas de Inspección Técnica de Vehículos (ITV). El principal objetivo de la ITV es garantizar que los vehículos en uso mantengan condiciones de seguridad análogas a las de los vehículos nuevos.

El sistema de dirección de los vehículos es uno de los puntos que se revisa durante la ITV, dado que es fundamental para su seguridad, al permitir generar las fuerzas laterales necesarias para seguir la trayectoria deseada por el conductor. Aparte de la comprobación visual del estado general de los elementos del sistema de dirección, se debe verificar la correcta geometría del mismo, denominada generalmente *alineación*. La alineación se podría definir como los distintos ángulos y distancias entre los planos que determinan las ruedas y los ejes sobre los que pivotan las mismas, con un sistema de referencia fijo en el vehículo o en el suelo.

El incorrecto ajuste de la alineación de un vehículo puede provocar, entre otros, un deterioro de sus aptitudes dinámicas, un desgaste prematuro e irregular

de los neumáticos que, a su vez, puede originar un reventón, o una mayor resistencia a la rodadura que implica una degradación innecesaria del medio ambiente por un exceso de consumo de combustible.

Los ángulos de alineación son de tan escasa magnitud que es necesario medirlos mediante instrumentos específicos. Un inspector de ITV avezado puede sospechar de una incorrecta alineación a partir de síntomas visibles, como un desgaste anormal de los neumáticos, pero resultaría más adecuado disponer de un método objetivo que determinase la correcta o incorrecta alineación del vehículo inspeccionado.

Actualmente, la inspección del sistema de dirección se ayuda de un dispositivo denominado “Placa alineadora” o “Alineador al paso”. A pesar de lo extendido de su utilización, no se ha producido una abundante bibliografía científica que estudie los fundamentos del método de inspección mediante placa alineadora, así como los factores que pueden influir en el resultado de la medida. En consecuencia, no existe un criterio objetivo y claro, que permita diagnosticar el estado de la alineación de un vehículo en la ITV en función exclusivamente de la medida realizada mediante la placa alineadora, sino que el dictamen se deja a discreción del inspector. A pesar de que la utilización de este dispositivo es obligatoria, y que se encuentra instalado en todas las líneas de ITV de turismos de España, hoy en día el resultado de su medida no es determinante para calificar el estado de la alineación de la dirección del vehículo inspeccionado, lo cual permite afirmar que, en cierto modo, este instrumento se encuentra infrutilizado.

Mediante la presente tesis doctoral se pretende establecer unas nuevas metodologías fiables de inspección del sistema de dirección de vehículos de tipo turismo mediante la placa alineadora, que permitan dictaminar si la alineación de los mismos resulta inadecuada para la circulación. Para ello, previamente es necesario realizar un estudio exhaustivo de los fundamentos en que se basa el ensayo mediante placa alineadora, y de los factores que pueden influir en la medida.

Los trabajos de esta tesis se han desarrollado al auspicio del proyecto de investigación TRA2004-03976/AUT, del Programa Nacional de Investigación, en el capítulo de medios de transporte, subprograma de automoción. Precisamente en el texto de la convocatoria se establecía lo siguiente, en cuanto a *“mantenimiento, inspección y diagnóstico de vehículos y componentes”*:

“se pretende dirigir y apoyar la oferta tecnológica existente, provocando nueva demanda para las oportunidades de desarrollo tecnológico de las empresas en esta área de indudable interés social, medioambiental y económico, ya que el mantenimiento de los vehículos y sus componentes dentro de su vida útil es una condición importante para la competitividad, y el mantenimiento de las condiciones de seguridad en niveles análogos a la de los vehículos nuevos”.

1.1 Estructura de la tesis

La estructura de esta tesis doctoral consta de ocho capítulos, siendo el primero de ellos la presente Introducción.

En el Capítulo 2 se presenta un análisis de los distintos aspectos relacionados con el objeto de esta tesis, la inspección de la alineación en la ITV, mediante el Estado del Arte que se ha realizado. Esta revisión abarca desde la teoría de la interacción entre neumático y suelo, con sus mecanismos de producción de fuerzas, hasta la normativa actual sobre inspección de vehículos, pasando por las alternativas técnicas para la comprobación de la alineación.

En el Capítulo 3 se plantean los objetivos a cubrir mediante la presente tesis doctoral.

En el Capítulo 4, se analizan los fundamentos del ensayo mediante placa alineadora, y las particularidades del sistema mecánico que esta constituye.

El Capítulo 5 se dedica a estudiar la influencia de los distintos factores involucrados en la medida con placa alineadora, y su relación con la alineación, planteando previamente el diseño de experimentos y la metodología seguida en los ensayos. En particular, se desarrolla también un modelo de la principal relación existente entre el ángulo de convergencia y la desviación lateral, del que se va a hacer uso para formular las propuestas de criterio de inspección.

En el Capítulo 6 se presentan las características de la medida de fuerzas laterales en el contacto neumático-suelo mediante una placa dinamométrica, y su comparación con la medida mediante placa alineadora, lo cual también es necesario a la hora desarrollar una de las nuevas metodologías de inspección propuestas.

En el Capítulo 7 se proponen los nuevos criterios de diagnóstico de la alineación de la dirección de vehículos en la ITV, a partir de la medida con placa

alineadora, que constituyen el principal objetivo de esta tesis. Se plantean tres propuestas distintas: una basada en la alineación recomendada por el fabricante, otra en la fuerza lateral producida por una incorrecta alineación, y la última establece un límite general de la desviación lateral medida mediante placa alineadora.

Para finalizar, en el Capítulo 8 se presentan las conclusiones obtenidas mediante la presente tesis doctoral, y los posibles desarrollos futuros a realizar.

Capítulo 2 Estado del arte

En este capítulo se analiza, primeramente, el marco legal en el que se inscribe la Inspección Técnica de Vehículos (ITV), así como su contribución a la seguridad vial. Seguidamente se trata el sistema de dirección de los automóviles, incluyendo las consecuencias negativas de una incorrecta alineación, para establecer las bases de la posterior discusión de los trabajos realizados en esta tesis. Con el mismo fin, se revisará el estado actual de conocimientos sobre la interacción entre neumático y suelo, para terminar con un repaso de los distintos dispositivos disponibles hoy en día para la medición de la alineación de los vehículos.

2.1 Normativa sobre automóviles

El automóvil tiene importantes implicaciones en la sociedad, lo que hace que sea el producto con más normativa aplicable en la Unión Europea (Díaz et al., 2007). Su regulación afecta a las distintas fases de vida de los vehículos, desde el diseño, pasando por la comercialización y utilización, hasta llegar a la retirada de circulación. A continuación se tratan los aspectos más importantes de cada una de dichas fases, de cara al objeto de esta tesis.

2.1.1 Reglamentación general

En primer lugar, la normativa de homologación establece las características que deben reunir el diseño y la construcción de un automóvil para poder ser autorizado a circular. En el ámbito de la Unión Europea, la mayoría de los vehículos están cubiertos por una “homologación de tipo”, para grandes series, de forma que el fabricante sólo tiene que homologar su modelo en un país de la Unión, teniendo validez en el resto de países. Esta autorización se basa en la confianza de que todas las unidades fabricadas de un modelo de vehículo siguen reuniendo las características que le permitieron obtener la homologación de tipo, hecho que tiene que certificar el fabricante para cada unidad, mediante el correspondiente Certificado de Conformidad (CoC, siglas de “*Certificate of Conformity*”). No obstante, se efectúan regularmente “controles de conformidad”, de la producción (en el país que concede la homologación) o de mercado (en el resto de países).

La legislación sobre homologación de automóviles fue una de las primeras en buscar un “Mercado Único” europeo para estos productos, con la Directiva Marco 70/156/CEE del Consejo, de 6 de febrero de 1970, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre la homologación de vehículos a motor y de sus remolques. Esta Directiva fue evolucionando hasta la 2001/116/CE de la Comisión, de 20 de diciembre de 2001, y finalmente la Directiva 2007/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de septiembre de 2007, por la que se crea un marco para la homologación de los vehículos de motor y de los remolques, sistemas, componentes y unidades técnicas independientes destinados a dichos vehículos. En estas Directivas Marco se especifican los requisitos que deben cumplir los vehículos en cuanto a seguridad, emisiones, etc., que se recogen en otras Directivas específicas y Reglamentos Internacionales (como frenos, dispositivos de retención, nivel sonoro, etc.).

La homologación de tipo europea ha ido afectando progresivamente a todas las categorías de automóviles: turismos, motocicletas, tractores agrícolas, y por último autobuses y vehículos industriales (estos últimos se están incorporando paulatinamente entre 2009 y 2014). Como en otros casos, la normativa europea se traslada posteriormente a las legislaciones nacionales. Así, la Directiva 70/156/CEE, establecía los conceptos de “Homologación de alcance nacional” y “Homologación CEE”, traspuestos a la legislación española en el Real Decreto 2140/1985, de 9 de octubre. Asimismo, los anexos del Real Decreto 2028/1986, de 6 de junio, y sus sucesivas actualizaciones, han ido incluyendo las Directivas y

Reglamentos Internacionales exigidos por las Directivas Marco anteriormente mencionadas.

En cuanto a la comercialización de vehículos, el objetivo de un “Mercado Único” para los automóviles en la Unión Europea se ve culminado (hecha la salvedad de las especificidades propias de los vehículos para el mercado británico) con el Reglamento CE nº 385/2009 de la Comisión, de 7 de mayo de 2009, que sustituye al anexo IX de la Directiva 2007/46/CE. En virtud de este reglamento, desde mayo de 2009 los fabricantes deben entregar obligatoriamente el Certificado de Conformidad con cada vehículo que cuente con la homologación de tipo europea (hasta entonces se entregaba únicamente a petición del comprador), lo cual posibilita en la práctica la compra de un vehículo en cualquier país miembro de la Unión, para su posterior matriculación en el país deseado con la mera presentación del CoC.

Una vez que el vehículo ha sido matriculado y puesto en circulación, se deben cumplir una serie de normas sobre su uso, que en España están contenidas, principalmente, en el Reglamento General de Vehículos (R.D. 2822/1998, de 23 de diciembre).

En lo que respecta a la normativa más relacionada con el objeto de esta tesis, se debe seguir asegurando que un vehículo en circulación conserva las condiciones que le permitieron obtener la homologación, y que son las que garantizan un uso seguro y respetuoso con el medio ambiente. Esta función de inspección es desempeñada en nuestro país por las ITV, como establece el Reglamento General de Vehículos en su artículo 10, “Inspecciones Técnicas de Vehículos”, que especifica que

“los vehículos matriculados o puestos en circulación deberán someterse a inspección técnica, que tras comprobar la identificación del vehículo, versará sobre las condiciones del mismo relativas a seguridad vial, protección del medio ambiente, inscripciones reglamentarias, reformas y, en su caso, vigencia de los certificados para el transporte de mercancías peligrosas y perecederas”

Aparte de la inspección técnica periódica, que es a la que se referirá en adelante simplemente como ITV, existen otros tipos de inspecciones llevadas a cabo en las estaciones ITV, y que no corresponden con el objeto de esta tesis. Por ejemplo, la inspección previa a matriculación (bien sea por carrozado inicial, importación, etc.), inspecciones por reformas y otros casos especiales.

Por último, la etapa final del ciclo de vida de los vehículos se encuentra cada vez más presente en la regulación. Así, cobran gran importancia las condiciones en que se realiza su retirada de circulación, con la consiguiente recuperación de sus materiales.

2.1.2 La ITV y su influencia en la seguridad vial

De manera general, la inspección periódica de vehículos pretende, básicamente, tres objetivos: asegurar que los vehículos en circulación mantengan unas condiciones de seguridad por encima de los mínimos exigidos, reducir el riesgo de accidentes por causas técnicas y proteger el medio ambiente a través de la reducción de las emisiones de los gases de escape.

En cuanto a los aspectos que afectan a la seguridad y reducción de accidentes, a continuación se citan algunos de los apartados más importantes del Manual de Procedimiento de Inspección de las estaciones ITV (MITYC-ITV, 2009), que son analizados en el transcurso de la inspección. Entre ellos destaca el 7.1, dentro del cual se enmarcan las metodologías de inspección del sistema de dirección propuestas.

APARTADO 2.- ACONDICIONAMIENTO EXTERIOR, CARROCERÍA Y CHASIS

2.2.- Carrocería y chasis

2.9.- Retrovisores

2.12.- Vidrios de seguridad

APARTADO 3.- ACONDICIONAMIENTO INTERIOR

3.1.- Asientos y sus anclajes

3.2.- Cinturones de seguridad y sus anclajes

3.3.- Dispositivo de retención para niños

APARTADO 4.- ALUMBRADO Y SEÑALIZACIÓN

4.1.- Luces de cruce y carretera

4.3.- Luces indicadoras de dirección

4.5.- Luces de frenado

APARTADO 6.- FRENOS

6.1.- Freno de servicio

6.5.- Dispositivo antibloqueo

6.18.- Tambores y discos

APARTADO 7.- DIRECCIÓN

→ ***7.1.- Desviación de ruedas***

7.2.- Volante y columna de dirección

7.3.- Caja de dirección

7.4.- Timonería y rótulas

7.5.- Servodirección

APARTADO 8.- EJES, RUEDAS, NEUMÁTICOS, SUSPENSIÓN

*8.1.- Ejes**8.2.- Ruedas**8.3.- Neumáticos**8.4.- Suspensión**APARTADO 10.- OTROS**10.6.- Reformas no autorizadas*

En la actualidad existe un amplio consenso acerca de que la ITV puede ser un instrumento efectivo para mejorar la seguridad vial, si bien no se aplica en todos los países occidentales. Por ejemplo, dentro de los EEUU no todos los Estados la practican.

A continuación se presentan algunos de los estudios que se han elaborado sobre la utilidad de la ITV. La mayoría de ellos llegan a conclusiones positivas en cuanto a su efecto sobre la seguridad vial. De forma general se ha comprobado que la implantación de la ITV consigue reducir el número de defectos presentes en los vehículos en circulación. A partir de ahí podrían intervenir otros factores en la producción de accidentes, como el humano, pero la mejora del estado mecánico parece preponderar sobre el resto. Por ejemplo, sólo algunos conductores tienden a asumir mayores riesgos cuanto mejor es la condición mecánica de su vehículo (Fosser, 1992).

En un estudio realizado por la Administración de los EEUU (G.A.O., 1990) se observa que en aquellos Estados de EEUU que tenían instaurados programas de ITV, el porcentaje de accidentes debidos a causas mecánicas era sensiblemente menor al resto de Estados (hasta un 20% menor). En el mismo sentido, a partir de la instauración de un sistema de ITV en el estado de Tejas en 1999, el porcentaje de accidentes por defecto mecánico se redujo desde el 12% anterior al 4% (SWOV, 2009).

Rechnitzer (Rechnitzer, Haworth & Kowadlo, 2000) efectúa un repaso a la bibliografía existente y señala que el efecto beneficioso de la ITV en cuanto a reducción de accidentes se ha llegado a evaluar hasta en un 16% del total de accidentes, y hasta el 50% de los debidos a defecto mecánico.

Van Schoor (van Schoor, van Niekerk & Grobbelaar, 2001) también apunta a la capacidad potencial de la ITV de reducir el número de defectos encontrados en los vehículos en circulación, que a su vez puede hacer disminuir en un 3% el número de accidentes.

Kolke (Kolke, 2002) considera imprescindible instaurar sistemas de ITV en los países en desarrollo, donde el estado mecánico de los vehículos presenta serias deficiencias, que son causantes de un porcentaje muy elevado de accidentes.

En el estudio realizado por el Instituto para la Seguridad de los Vehículos Automóviles (ISVA) de la Universidad Carlos III de Madrid (Díaz et al., 2007) se llega a la conclusión de que en España, el hecho de tener instaurado un sistema de ITV contribuye a reducir el número de defectos mecánicos en los automóviles, evitándose más de 400 víctimas mortales, cerca de 12.000 heridos de distinta consideración y casi 8.500 accidentes de circulación al año.

De entre los estudios que no encuentran una relación clara entre ITV y reducción de accidentes, se pueden destacar los relativos al caso de Noruega. Christensen y Elvik (Christensen & Elvik, 2007) analizan la situación en dicho país, tras haber implementado en 1995 un sistema de ITV equiparable al utilizado en la Unión Europea. Estos autores no llegan a observar una reducción en la tasa de accidentes respecto a la situación anterior a la instauración de la ITV. Fosser (Fosser, 1992) ya había predicho el nulo efecto de la ITV sobre la accidentalidad en Noruega, tras experimentar distintos esquemas de ITV sobre 204.000 turismos. Estos resultados quizás podrían explicarse por una mayor concienciación de los automovilistas noruegos por mantener sus vehículos en buen estado mecánico, sin necesidad de una obligación legal.

2.1.3 Normativa específica de inspección

La inspección técnica de vehículos tiene implicaciones más allá de la seguridad vial, como pueden ser la producción o el comercio de vehículos en el mundo, ya que debería exigirse lo mismo a un vehículo en un país o en otro, pues a lo largo de su vida útil puede que circule por otro país distinto al de matriculación. Por este motivo, se han desarrollado acuerdos a nivel internacional para el reconocimiento mutuo de la normativa en este ámbito, y se exponen a continuación.

2.1.3.1 Reglamentación internacional

Desde 1958 la Comisión Económica Para Europa de la O.N.U. (CEPE/ONU) persigue la armonización en general de la reglamentación técnica sobre vehículos en todo el mundo (CEPE/ONU, 1958). Los reglamentos nacionales de los países acogidos al acuerdo de 1998 (CEPE/ONU, 1998a) deben estar

inscritos en un registro único, y estar confeccionados con arreglo a una serie de recomendaciones de la O.N.U.

En lo que refiere específicamente a la ITV, se intenta extender los beneficios de los programas de inspección al mayor número de países posible, como se desprende del Informe del Secretario General de la ONU sobre la “Crisis de seguridad vial en el mundo” (ONU, 2003), en el punto 32:

32. Falta de programas de inspección de vehículos. La falta de un mantenimiento adecuado de los vehículos y los vehículos pesados es un factor que contribuye al problema de las lesiones por accidentes de tráfico vial. En muchos países no hay normas de inspección que requieran el registro anual de los vehículos. Esto puede deberse a falta de servicios de capacitación para el personal de inspección, insuficiencia de recursos y/o la baja prioridad que se da a este problema.

Con posterioridad, en otro Informe de la ONU (ONU, 2005) se vuelve a incidir en su importancia, dentro de las actividades a realizar, punto III, B.17:

(...) Las resoluciones proporcionan medidas y prácticas que deben aplicar los Estados Miembros e incluyen medidas relacionadas con (...) las inspecciones técnicas de vehículos (...). En las revisiones actuales, que los países aplican de manera voluntaria, se tiene en cuenta la situación de la mayor cantidad posible de países para que las resoluciones que se adopten sean aplicables en todo el mundo.

La CEPE/ONU adoptó en 1997 un Acuerdo para equiparar las condiciones de la ITV entre sus miembros, y establecer el reconocimiento mutuo de las mismas (CEPE/ONU, 1997). Actualmente se han adherido al mismo algunos países del Este de Europa, y Holanda. En 2005, el Consejo Europeo autorizó a la Comisión para negociar la adhesión de la Unión Europea a dicho Acuerdo, pero en 2008 se llegó a la conclusión de que no era posible por las importantes diferencias con la normativa europea.

En el ámbito europeo, aparte de las legislaciones nacionales, la Comunidad Europea adoptó en 1977 la Directiva 77/143/EEC sobre ITV para vehículos comerciales, revisada en 1992 por las Directivas 92/54/EEC y 92/55/EEC para incluir a los turismos. La Directiva 96/96/EC (Consejo Europeo, 1996) consolidó a las anteriores, y estableció la lista de elementos a ser inspeccionados. Posteriormente ha sido derogada por la Directiva 2009/40/EC, cuyos cambios principales se refieren a aspectos formales.

Asimismo, la Unión Europea (U.E.), dentro del Programa de acción europeo de seguridad vial 2003-2010, en su apartado 5.2.5, relativo a la inspección técnica periódica, establece lo siguiente:

“Los fallos mecánicos desempeñan actualmente un papel de escasa importancia en los accidentes de tránsito gracias a la generalización de las inspecciones técnicas, cuyas condiciones de ejecución - aplicables a todo tipo de vehículos, desde el turismo hasta el camión - se establecen en la normativa comunitaria. No obstante, las inspecciones deberán adaptarse atendiendo a la creciente complejidad de las tecnologías presentes a bordo de los vehículos y a sus modos operativos para así garantizar su correcto funcionamiento a lo largo del ciclo de vida del vehículo.

*La Comisión examinará la oportunidad de incluir otras categorías de vehículos en las inspecciones técnicas, así como la **promoción de métodos alternativos que garanticen un resultado equivalente**.*

Por otra parte, la Comisión estudia su adhesión a los acuerdos internacionales de 1997 con objeto de lograr una armonización internacional de las normas mínimas de inspección.

Estudiar con los Estados miembros la conveniencia de incluir los nuevos sistemas electrónicos instalados a bordo en la inspección técnica.

*Establecer e impulsar las mejores prácticas con objeto de **incrementar la eficacia de las inspecciones periódicas obligatorias al menor coste posible**.*”

En el Libro Blanco de la Comisión: “La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad” (Comisión Europea, 2001), se realiza otra mención especial a la importancia de la ITV en la UE. Se expresa lo siguiente, en referencia a la inseguridad vial:

*“Varios estudios ponen de manifiesto que los conductores europeos esperan medidas más estrictas en el ámbito de la seguridad vial, como la mejora de la calidad de las carreteras, una formación más adecuada para los conductores, la aplicación de las normas de circulación, **la inspección técnica de los vehículos** y las campañas de seguridad vial.*

*(...) Hasta los años 90, resultó difícil formular la actuación comunitaria en materia de seguridad vial, por la falta de competencias explícitas en este ámbito. Con todo, la Comunidad lleva tiempo contribuyendo a la seguridad vial. La instauración del mercado interior permitió desarrollar, especialmente mediante la normalización técnica, equipos automóviles seguros, merced a más de 50 directivas (utilización obligatoria de los cinturones de seguridad, normas para el transporte de mercancías peligrosas, utilización de dispositivos de limitación de velocidad para los camiones, permisos de conducción normalizados **e inspección técnica para todos los vehículos**).*”

2.1.3.2 Reglamentación española

El origen de la ITV en España se sitúa en el año 1985, con la publicación del Real Decreto 2344/1985, por el que se regula la inspección técnica de vehículos.

Las estaciones de ITV son competencia de las Comunidades Autónomas (C.C.A.A.), que pueden prestar el servicio directamente, a través de empresas mixtas, o mediante concesión o autorización administrativa a empresas privadas (R.D. 224/2008). En nuestro entorno, en algunos países los talleres de reparación y los concesionarios están autorizados a realizar ellos mismos la ITV oficial (este es el caso de Reino Unido, Italia y, en mayor medida, Alemania). Sin embargo, en el polo opuesto se encuentran otros países como Suecia y Suiza, donde la ITV se realiza por centros mayoritariamente públicos.

En el Manual de Procedimiento de Inspección de las ITV (MITYC-ITV, 2009) se citan una serie de principios que debe cumplir la inspección en España, que como se indica en la Directiva 96/96/EC “debería ser relativamente simple, rápida y barata”. Dichos principios, que se recogen a continuación, serán tenidos en cuenta a la hora de formular las propuestas de procedimiento de inspección, objetivo de esta tesis:

La inspección técnica periódica de los vehículos tiene por objeto comprobar si los mismos siguen cumpliendo las condiciones exigidas, recogidas en este manual, para su circulación por las vías públicas.

Las comprobaciones durante el proceso de inspección deben ser lo más simples y directas posibles.

Durante el proceso de inspección no se efectuará desmontaje alguno de los elementos y piezas del vehículo.

Los equipos y herramientas que se utilicen en la inspección serán los necesarios para la comprobación del sistema del vehículo de que se trate. El reconocimiento de las condiciones técnicas de las instalaciones que constituyen las estaciones de inspección técnica de vehículos, es competencia de la Comunidad Autónoma correspondiente, siendo esta, por tanto, la que en cada caso fija los equipos de que debe estar dotada una estación, mediante los procedimientos previstos en la legislación vigente.

La inspección técnica del vehículo deberá poder realizarse en un tiempo limitado.

En el Capítulo 7 de esta tesis se analizarán las recomendaciones existentes sobre la inspección del sistema de dirección en la ITV, de cara a formular unas nuevas propuestas de procedimiento de inspección.

2.2 Sistema de dirección

Los automóviles están constituidos por “sistemas” que se ocupan de desempeñar las distintas funciones necesarias para la circulación. Por ejemplo, el sistema de suspensión, encargado, entre otras, de filtrar las irregularidades del terreno, transferir las fuerzas y asegurar un contacto óptimo entre el vehículo y el suelo, o el sistema de dirección, que ejerce la labor de inscribir el vehículo en la trayectoria marcada por el conductor. Cada uno de estos sistemas ha experimentado una incesante evolución, desde los inicios de la automoción hasta nuestros días, siendo este uno de los sectores industriales con mayor intensidad en innovación.

Un ejemplo paradigmático de la importancia de los desarrollos que se han ido introduciendo en el automóvil se encuentra en el propio sistema de dirección: al principio, los vehículos automóviles no eran más que carros de caballos, pero “sin caballos”, por lo que cada uno de sus sistemas no eran óptimos para la nueva forma de propulsión. No obstante, los carruajes en que se basaron los primeros automóviles ya incorporaban algunos avances significativos. Por ejemplo, el sistema de dirección ya no era un simple eje vertical directamente acoplado a los caballos, que hiciera girar hacia un lado u otro todo el eje delantero rígido, necesitando para ello mucho espacio libre alrededor de las ruedas para permitir el giro del mismo. Se había inventado ya la dirección independiente en cada rueda, que necesitaba que las dos ruedas fuesen perpendiculares al radio de la curva, condición esta que se resolvió con la conocida como “relación de Ackermann”, patentada en 1817 con Rudolph Ackermann como agente, y con cuyo nombre ha pasado a la historia, pero inventada realmente por Georg Lankensperger. La idea había sido apuntada con anterioridad por Erasmus Darwin en 1758, y no fue aplicable hasta el desarrollo de Charles Jeantaud en los años 1870. Aplicada por primera vez en la práctica por Edward Butler en 1885, esta fue finalmente patentada en su forma mejorada por Karl Benz en 1893 (King-Hele, 2002).

En los siguientes apartados se proporciona una breve descripción de la geometría de la dirección y sus implicaciones.

2.2.1 Geometría de la dirección

Dentro del sistema de dirección, la geometría de la misma constituye una de las características principales, y resulta fundamental para el buen control del vehículo que se encuentre bien ajustada.

La labor de diseño de los sistemas de suspensión y dirección de un nuevo modelo de automóvil busca el compromiso entre comodidad y efectividad. No existe un “método universal” para determinar la geometría y los ángulos de dirección óptimos para cada vehículo, sino que cada fabricante de automóviles cuenta con un equipo de profesionales con gran experiencia en ese campo, que la aplica a sus vehículos, y los ajusta mediante ensayos.

Como norma general, el sistema de dirección, en conjunto con la suspensión, intenta que la zona de contacto entre rueda y firme sea siempre óptima, independientemente de la diferencia de altura de las ruedas o del giro del volante. Con este objetivo, por ejemplo, se introducen las barras estabilizadoras, o se proporciona mayor caída negativa a la rueda exterior a la curva, a medida que se gira el volante, para preparar el vehículo a inscribirse en la trayectoria con esa rueda lo más perpendicular posible al asfalto.

Sin embargo, apenas existe bibliografía sobre los criterios para el diseño de vehículos en cuanto a ángulos de dirección, y la que hay se limita a optimizar algún aspecto en concreto. Por ejemplo, Modak (Modak et al., 2008) estudia, mediante análisis cinemático, el efecto de los “*silent-blocks*” y las tolerancias de las distintas articulaciones en la variación de la geometría de la dirección en un vehículo con suspensión delantera de doble brazo. Por su parte, De Juan (de Juan et al., 2008) busca optimizar, mediante síntesis óptima dimensional, el diseño de los distintos componentes que determinan la geometría de la dirección, de cara a minimizar el *error estructural* (diferencia entre el ángulo real girado por una rueda, y el ideal que correspondería a la aplicación de la relación de Ackermann).

Cabe destacar que el sistema de dirección no es algo rígido, cuya geometría sea inamovible. Al contrario, al verse sujeto a las acciones de la calzada sobre el vehículo en marcha, su geometría se ve constantemente modificada (Holdmann, Philip & Bertram, 1998). Habibi (Habibi, Shirazi & Shishesaz, 2008) analiza el comportamiento en cuanto a variación de los ángulos de dirección de una suspensión de tipo McPherson ante las inclinaciones de la carrocería producidas al

circular en curvas, y propone una técnica de optimización geométrica mediante algoritmos genéticos para minimizar dicha variación angular.

Por otro lado, algunas de las acciones bruscas a que se ve sometida la dirección, como subidas a bordillos, giro de volante con ruedas frenadas, etc., pueden provocar desajustes permanentes, que se suman a los producidos por la conducción normal. Por ello es necesario comprobar regularmente la alineación de los vehículos una vez salidos de fábrica, para evitar los posibles riesgos para la seguridad, lo cual constituye precisamente uno de los objetivos de la ITV.

Una muestra más de la complejidad de los modernos sistemas de dirección, es que en la actualidad resulta difícil garantizar incluso que los vehículos que salen de una línea de montaje de una fábrica tengan la dirección perfectamente reglada, a no ser que se mida y ajuste cada unidad una vez finalizado el ensamblaje, mediante dispositivos como los que se mencionan en el apartado 2.4.2, “Medidores de ángulos 3D”. En caso de no realizar este ajuste final, los fabricantes encuentran que la alineación es una de las principales causas de reclamaciones tempranas en garantía por parte de los compradores, por lo que les interesa evitar en lo posible esta fuente de descontento para los clientes. Sohn y Park (Sohn & Park, 2004) miden la variabilidad en el ajuste de la dirección en una muestra de 30 vehículos a la salida de una línea de montaje, antes del ajuste de la alineación. El error en el ajuste del ángulo de convergencia total del eje llega a ser hasta de $0,5^\circ$ sobre el ángulo recomendado por el propio fabricante, lo cual constituye una magnitud cuyos efectos negativos son apreciables ya por el conductor.

La razón para que se haga necesario el mencionado ajuste una vez fabricado el vehículo es porque se ha llegado a un alto grado de perfeccionamiento y repetibilidad en la mayoría de los demás sistemas de los automóviles, que hace que prácticamente no requieran de reglaje y puesta a punto al final de la línea de montaje, pero no es así en los elementos que constituyen la dirección. Esto es debido en gran medida a que cada uno de los componentes de la dirección se fabrica con una cierta variabilidad. Algunos de ellos son elementos roscados, que permiten su posterior ajuste a lo largo de la vida del vehículo, a medida que las piezas se van asentando y deformando (Arias-Paz, 1999). Otros componentes son elásticos, como los cojinetes de caucho, o “*silent-blocks*”, utilizados en mucha menor medida en vehículos de competición, y que tienen por objetivo contribuir a la comodidad de los ocupantes, filtrando las pequeñas irregularidades del asfalto, vibraciones, ruido, y buscar que el sistema de dirección sea más tolerante frente a

impactos que podrían ocasionar fracturas de no ser por esta flexibilidad. Además de los ya citados, son tantos los componentes de un moderno sistema de dirección, habitualmente con holguras en sus uniones, que el efecto de todas las variabilidades es prácticamente impredecible. Esto hace que en muchos casos sea necesaria una posterior regulación, sobre todo del eje delantero, por su mayor complejidad, al ser este eje el único que contribuye a la dirección en la mayoría de los automóviles. No obstante, en los turismos actuales, las posibilidades de reglaje de la alineación son cada vez menores, limitándose en la mayoría de ellos a la simple modificación del ángulo de convergencia en el eje delantero.

A continuación, se definen los ángulos de alineación más importantes, también conocidos bajo el término de “cotas de la dirección”, así como su efecto sobre el comportamiento y seguridad del vehículo. Algunos de los conceptos son solamente aplicables al eje delantero del vehículo, por ser el único que normalmente dispone de la función de dirección, como los ángulos de salida o avance.

En el Anexo I: Sistema de referencia SAE, se proporcionan otras definiciones relacionadas con la geometría de las ruedas, y las fuerzas y momentos que estas desarrollan.

2.2.1.1 Ángulo de caída

El ángulo de caída (γ) es el ángulo formado por el plano X-Z SAE (definido en el Anexo I) y el plano medio de la rueda. Es positivo cuando el plano medio de rueda está más separado del plano medio del vehículo en la parte superior de la rueda que en la inferior.

También se puede definir como el ángulo que forma el eje de mangueta (definido igualmente en el Anexo I) con una línea horizontal situada en el plano vertical que pasa por este eje. Este ángulo, asimismo, es igual al formado por una vertical con el plano medio de la rueda (Figura 2.1).

Un ángulo de caída distinto de cero puede modificar la forma del área de contacto entre el neumático y el suelo en condiciones de circulación en curva. Su efecto más inmediato es que la rueda que está “caída” hacia un lado, tiende a girar hacia ese mismo lado ejerciendo una fuerza lateral, de manera análoga a como lo hace una motocicleta al inclinarse, o un cono al que se intentase hacer rodar por el suelo, ya que el ángulo de caída hace que el neumático tome forma cónica, por la deformación desigual producida en el contacto con el suelo. Dado que los radios

efectivos del neumático son distintos en el lado hacia el que está inclinado y en el otro, esto hace que el lado con radio mayor empuje la rueda hacia el otro y se produzca un deslizamiento y desgaste, al tener que girar solidariamente ambos lados del neumático. La consiguiente fuerza lateral no presenta mayor inconveniente siempre que las ruedas de un mismo eje posean el mismo ángulo de caída, dado que así las fuerzas que ejercen sobre la dirección se compensan, y el vehículo avanza en línea recta, no “tirando” más una rueda que otra hacia un lado. Sin embargo, si una de las ruedas pierde adherencia, el vehículo tenderá a girar hacia un lado. Como ejemplo, esta fuerza lateral (producida por hasta 20° de caída) es aprovechada por vehículos de movimiento de tierra de tipo “motoniveladora”, para compensar la fuerza lateral producida por la cuchilla con la del ángulo de caída de las ruedas delanteras, y seguir avanzando en línea recta (ver Figura 2.2).

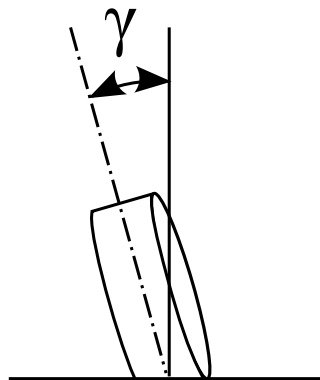


Figura 2.1 Ángulo de caída

Si el ángulo de caída es negativo, facilita que la rueda exterior a la curva se mantenga vertical al suelo mientras la describe, a pesar de la inclinación de la carrocería, aumentando así la transferencia de fuerza lateral al pavimento. Por otro lado, un ángulo de caída con signo negativo constituye un “virtual” ensanchamiento del eje, debido a que la distancia entre centros de las huellas de contacto de ambos lados de un eje se ve incrementada (ver Figura 2.3). Ambos efectos de la caída negativa pueden tener un resultado beneficioso en cuanto a la estabilidad del vehículo, mejorando sus cualidades dinámicas. Sin embargo, dado que el aumento de la carga del vehículo y las fuerzas verticales que se producen en circulación provocan que la suspensión se comprima y, por norma general, el diseño de la suspensión (con un brazo superior más corto que el inferior) hace que el ángulo de caída tienda hacia valores negativos al comprimirse esta (Blundell & Harty,

2004a), algunos modelos de turismos se diseñan con una ligera caída positiva con el vehículo en vacío, para que al montar los pasajeros y circular, este ángulo se acerque a cero.



Figura 2.2 Motoniveladora compensando fuerza lateral (Fuente: John Deere)

En todo caso, un ángulo de caída positivo también puede conllevar efectos beneficiosos. Por ejemplo, contribuye a reducir el denominado “radio de rodadura” (en inglés “*scrub radius*”; definido en el Anexo I), cuyo efecto será presentado en el apartado siguiente.

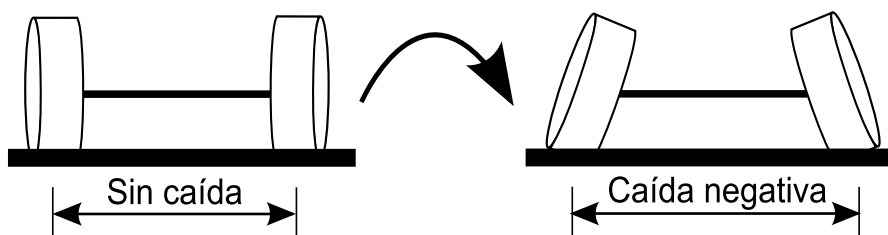


Figura 2.3 Ensanchamiento del ancho de vía efectivo, debido a un ángulo de caída negativo

En general, cualquier ajuste inadecuado del ángulo de caída, ya sea positivo o negativo, provoca un desgaste mayor de los neumáticos en la parte interior de su banda de rodadura, en el caso de caída negativa, o en el exterior, en caso contrario. En vehículos de competición, donde el desgaste del neumático no es importante, siempre que aguante una carrera o el tiempo que se tenga establecido para su cambio, se puede ajustar el ángulo de caída a valores fuertemente negativos para obtener velocidades de paso por curva mayores.

Como peculiaridad, dado que en países con índice de precipitaciones elevado, las carreteras secundarias suelen estar muy abombadas en el centro con el fin de evacuar el agua hacia las cunetas (hasta 5° de inclinación), es práctica común el ajustar la caída de los vehículos que circulan fundamentalmente por este tipo de carreteras de manera que se compense la tendencia del vehículo a irse hacia la cuneta sin tener que girar el volante hacia el centro, y evitar además el desgaste irregular. Este efecto se consigue con diferencias de caída de un lado a otro del eje de alrededor de $0,25^\circ$ o $0,5^\circ$.

2.2.1.2 Ángulo de salida

El ángulo de salida (δ) se define como la proyección sobre un plano perpendicular al plano longitudinal de simetría del vehículo del ángulo agudo que forma con la vertical el eje pivote (definido en el Anexo I) (Figura 2.4).

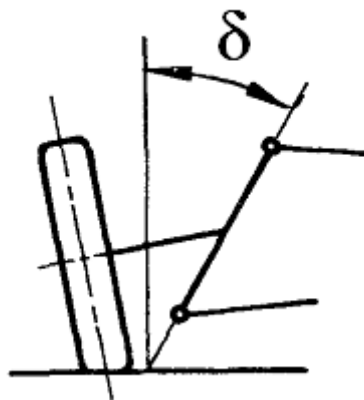


Figura 2.4 Ángulo de salida δ (AENOR, 1987)

La suma de este ángulo con el de caída recibe el nombre de “ángulo comprendido”. También en conjunto con el ángulo de caída, el ángulo de salida determina el mencionado “radio de rodadura”. En un sistema de dirección ideal, se buscaría que este radio fuera nulo, con el eje pivote justo en la vertical del contacto neumático-suelo, para reducir el momento que generan los esfuerzos longitudinales en el neumático sobre el sistema de dirección. Sin embargo, en la realidad se debe reservar un espacio para los rodamientos, componentes del freno, etc. Además, la existencia de un cierto “radio de rodadura” reduce el esfuerzo que necesita el conductor para girar el volante, al permitir que el neumático ruede en cierta medida cuando se efectúa ese giro.

Aparte de su efecto sobre el radio de rodadura, el principal efecto del ángulo de salida en sí consiste en hacer que la dirección vuelva al punto central por sí sola tras haberla girado (el normalmente buscado efecto “autoalineante”), al desarrollar un cono de trayectorias que comprimen la suspensión. Así, dado que la rueda está en contacto con el suelo, no puede penetrar en el mismo cuando se gira el volante, por lo cual se inclina hacia fuera separándose de la línea recta de avance (Blundell & Harty, 2004a). Esto produce que las articulaciones de rótula y las piezas que las sujetan tiendan a subir, lo cual implica un levantamiento de la carrocería. El hecho de que la carrocería se levante de un lado cada vez que las ruedas se apartan de la dirección rectilínea hace que el peso del coche actúe sobre el mecanismo de la dirección, tendiendo a restituir las ruedas a la posición de línea recta una vez completado el viraje, cuando el conductor suelta el volante para deshacer su giro (Milliken & Milliken, 1995).

Los valores típicos de este ángulo se encuentran entre 9 y 14°, y no es responsable de la generación de desgaste ni de fuerzas laterales en el neumático.

Como dato a señalar, este ángulo es fijo; no se puede regular en prácticamente ningún turismo convencional, con lo cual la utilidad de efectuar su medición es discutible, ya que en todo caso no se podría cambiar su ajuste, en caso de ser este incorrecto.

2.2.1.3 Ángulo de avance

El ángulo de avance (β) se define como la proyección sobre un plano paralelo al plano longitudinal medio del vehículo del ángulo agudo que forma con la vertical el eje de pivote (Figura 2.5). Es positivo cuando el eje está inclinado hacia atrás.

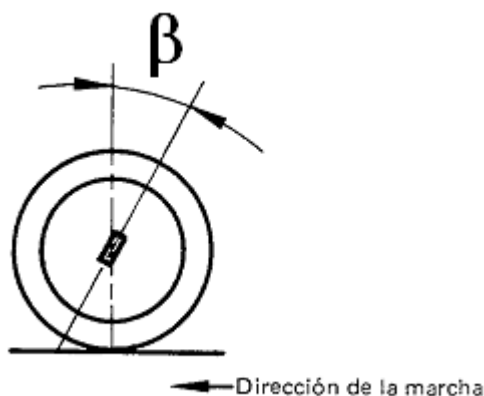


Figura 2.5 Ángulo de avance β (AENOR, 1987)

Este ángulo influye de manera importante en la estabilidad del vehículo. Cuando es positivo, tiene un efecto estabilizante sobre la dirección; es decir, hace que aunque no se mantenga asido el volante, este tienda a volver a su posición central después de una curva y permanezca en ella. Dado que el punto de aplicación de la resultante de fuerzas entre neumático y suelo (aproximadamente el centro del área de contacto) se encuentra retrasado respecto al eje de pivote, el momento producido por la misma hace que la huella se sitúe alineada con la intersección del pivote con el suelo, en la dirección de la marcha. Su efecto práctico se puede visualizar con el ejemplo de la bicicleta cuya horquilla esté inclinada hacia atrás: aunque se suelten las manos mientras circula, el manillar seguirá recto. El ángulo de avance positivo también contribuye a aumentar el ángulo de caída negativo en la rueda exterior al tomar las curvas, por la disposición geométrica habitual del sistema de dirección. En contrapartida, un excesivo ángulo positivo puede hacer que cueste mucho trabajo girar el volante, que este vuelva a su posición después de una curva demasiado rápido, que transmita muchas vibraciones a las manos del conductor o que sea necesario un mayor ángulo de giro para conseguir modificar la trayectoria.

El avance negativo produce efectos contrarios al positivo y, por lo tanto, menos deseables. Además, provoca inestabilidad perceptible en forma de vibraciones. Aún así, se usa en algunos vehículos, que lo compensan con otros ajustes de la dirección.

Al igual que los demás parámetros de la dirección, es importante que el ángulo de avance de las ruedas de los dos lados de un eje sea el mismo, ya que si no los efectos que este ángulo produce no estarían equilibrados, y el vehículo tendería a girar hacia el lado en que tiene menos avance positivo. Siempre que sea simétrico, el ajuste del ángulo de avance no influye en el desgaste de los neumáticos, ni genera fuerzas laterales en los mismos.

2.2.1.4 Ángulo de deriva o deslizamiento

De manera general, el ángulo de deriva de cada rueda se define como el ángulo comprendido entre la dirección de desplazamiento del centro de la superficie de contacto entre neumático y suelo (vector velocidad del mismo) y el eje X de la rueda (referido al sistema de referencia SAE del Anexo 1).

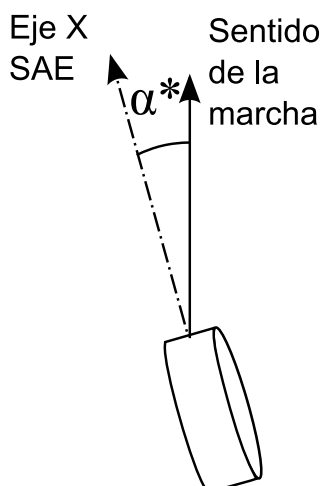


Figura 2.6 Ángulo de deriva α^* , vista en planta

En este documento se denotará como α^* , para diferenciarlo del ángulo de convergencia (α), por la razón que se indica a continuación, en la definición de este último.

2.2.1.5 Ángulo de convergencia

A diferencia del ángulo de deriva, que se define independientemente de las circunstancias en que se mida, el ángulo de convergencia (α) de cada rueda (Figura 2.7) se puede definir como el ángulo de deriva existente cuando el vehículo describe una trayectoria en línea recta sin necesidad de ejercer ninguna fuerza sobre la dirección.

En general, cuando se habla de *alineación* o paralelismo de ruedas, se suele referir únicamente a este ángulo de convergencia, ya que habitualmente es el único ángulo ajustable en los turismos.

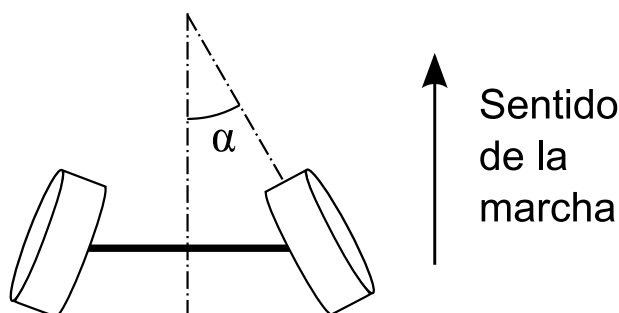


Figura 2.7 Ángulo de convergencia α , vista en planta

Por lo tanto, aparte de la definición general dada anteriormente al ángulo de deriva, el ángulo de convergencia se puede definir también de las formas siguientes (siempre que el vehículo circule en línea recta con el volante desasido):

- El ángulo agudo que forma el diámetro horizontal de la rueda con el plano longitudinal medio del vehículo.
- El ángulo agudo entre el plano vertical que pasa por el eje de la mangueta y el plano perpendicular al plano longitudinal medio del vehículo.
- También es habitual definirlo como dimensión lineal, siendo la diferencia entre las distancias de la parte delantera y trasera del neumático al plano medio del vehículo (o entre las partes delanteras y traseras directamente entre sí). Esta medida resulta fácil y rápida de realizar en un vehículo de competición tipo “fórmula” o kart, pero no en un turismo, debido al compartimento motor.

Según la norma UNE 26192:87 (AENOR, 1987), se pueden usar tanto unidades angulares como de longitud. En este último caso, la medida obtenida es la convergencia total del eje (definida a continuación).

Se denomina convergencia total de un eje a la suma algebraica de las convergencias parciales de cada rueda. Estas, a su vez, son positivas cuando su eje X se cruza con el plano medio del vehículo por delante de este, en el sentido de la marcha (Figura 2.8).

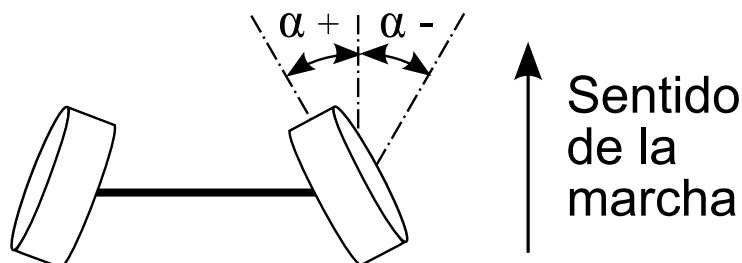


Figura 2.8 Signo de la convergencia, vista de planta

Una forma habitual de expresar la convergencia total de un eje es mediante la distancia lateral que recorrerían los neumáticos debido al ángulo formado con el plano medio del vehículo, si pudieran moverse lateralmente uno respecto al otro. Esta distancia se suele medir en m/km (metros laterales que habrían recorrido al cabo de un kilómetro de desplazamiento longitudinal), y denominarse de forma genérica “desviación lateral”, D_l , siendo esta, como se verá, la magnitud medida por la placa alineadora. Si bien en esta medida podrían influir otros factores aparte de la convergencia, se ha encontrado (Capítulo 5) que esta es la que tiene la mayor contribución.

En principio, se suele buscar que el ángulo de convergencia con el vehículo circulando sea lo más próximo posible a cero, por los efectos que se presentan a continuación, y cuyas consecuencias serán analizadas más en detalle en el apartado 2.2.3:

- Cualquier ángulo de convergencia distinto de cero, si se mantiene durante la circulación del vehículo (no sólo en condiciones estáticas), puede provocar un desgaste desigual de los neumáticos. El desgaste se produce en la parte exterior del neumático cuando presenta convergencia positiva, y en la interior en caso contrario.
- Otro efecto pernicioso del ángulo de convergencia distinto de cero en circulación es el aumento de la resistencia a la rodadura de aproximadamente un 1% por cada $0,17^\circ$ de ángulo de convergencia total del eje (Reimpell, Stoll & Betzler, 2000b) y, como resultado, un mayor consumo de combustible. Por lo tanto, la detección de ángulos de convergencia desajustados no sólo contribuye a la seguridad vial sino también al cuidado del medio ambiente, apartado este que cobra cada vez más importancia dentro de los objetivos de la ITV. Sin embargo, una consecuencia derivada del aumento de resistencia a la rodadura es que se provoca una mayor temperatura del neumático en circulación. Este es un factor que podría considerarse positivo en la competición, al poder redundar, a su vez, en una mayor adherencia en el momento que se necesite desarrollar una fuerza lateral, pero no es un objetivo a buscar en la circulación habitual de los turismos.
- Además de las ya mencionadas, otra consecuencia negativa de un ángulo de convergencia incorrectamente ajustado es que la consiguiente fuerza lateral que se produce de forma continua en circulación reduce la capacidad máxima de generación de fuerzas adicionales en el contacto neumático-suelo, que pueden ser necesarias para una maniobra de emergencia.

Para conseguir un determinado ángulo de convergencia a una cierta velocidad de circulación, se deben tener en cuenta los efectos de transmisión de potencia y resistencia a la rodadura de los vehículos, ya que las fuerzas longitudinales que estos producen en la huella de contacto ocasionan una variación

de este ángulo desde las condiciones estáticas a las de circulación. Este efecto es distinto en vehículos de tracción delantera y trasera, y se trata a continuación.

En los vehículos de tracción delantera, las ruedas delanteras efectúan una acción de “tracción” respecto del resto del automóvil, con lo que, debido a la mencionada elasticidad del conjunto del sistema dirección-suspensión, este conjunto sufre un desplazamiento hacia delante con respecto al chasis, con el consiguiente giro en la misma dirección, cuando se aplica potencia a las ruedas. Por lo tanto, aunque también se suele configurar el eje delantero con convergencia positiva para contrarrestar el efecto de “apertura” que se produce al frenar o dejar de acelerar, es más habitual que los fabricantes provean a los vehículos de tracción delantera con una ligera divergencia (convergencia negativa delantera) (Reimpell, Stoll & Betzler, 2000b).

Sin embargo, en los de tracción trasera, el eje trasero realiza una acción de “propulsión” respecto del delantero, causando que la resistencia a la rodadura de las ruedas delanteras las haga retrasarse respecto al chasis, con lo que se les suele dar convergencia positiva para que al aplicar potencia al eje trasero, la convergencia del delantero sea lo más cercana posible a cero. En la Figura 2.9 se puede observar este efecto sobre el eje delantero: la resistencia a la rodadura origina la fuerza F_R , que actúa sobre el eje pivote empujando la rueda delantera hacia atrás, mediante un brazo de longitud r_a , ya que la reacción F_T , a través de la barra de acoplamiento de la dirección, se ve sujeta a la existencia de elementos flexibles y con juegos.

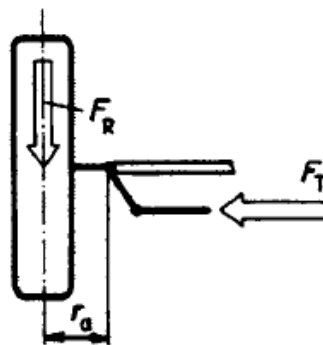


Figura 2.9 Efecto de la propulsión sobre el ángulo de convergencia del eje delantero, vista de planta
(Reimpell, Stoll & Betzler, 2000b)

Por este motivo, como norma general los fabricantes establecen para sus vehículos ángulos de convergencia distintos de cero cuando el coche se encuentra detenido, para conseguir así que este ángulo se aproxime a cero en marcha a la

velocidad habitual (cuando los elementos que tenían juego lleguen a su tope). En el apartado 7.4.1 se indica el rango en que se suele encontrar el ángulo de convergencia para turismos convencionales.

Si en vez de generar una fuerza longitudinal al aplicar un par motor a las ruedas, esta se produce al efectuar el frenado del vehículo, se origina el efecto contrario: el juego en los elementos de la dirección hace que en este caso se modifique también el ángulo de convergencia, afectando a la estabilidad direccional, lo cual resulta en que este factor sea asimismo tenido en cuenta a la hora de diseñar un sistema de dirección-suspensión (Klaps & Day, 2005). Cabe señalar que, como normalmente las fuerzas longitudinales que se pueden generar en frenado son mayores que en tracción, este efecto es también mayor en este caso, y es del mismo signo independientemente del tipo de tracción del vehículo. Además, durante una frenada, la transferencia de masa al eje delantero provoca que se varíe el recorrido de la suspensión (este fenómeno se tratará con más detalle en el apartado 5.4.7) en mayor grado que en una aceleración, lo cual puede también ser utilizado a la hora de diseñar la geometría de la dirección para que la consiguiente variación del ángulo de convergencia contribuya a la estabilidad del vehículo durante las frenadas.

A pesar de lo expuesto anteriormente, no siempre se pretende que el vehículo alcance un ángulo de convergencia nulo a una cierta velocidad, ya que, por ejemplo, una ligera convergencia (positiva) de las ruedas delanteras mejora la estabilidad del vehículo en línea recta a altas velocidades. El efecto sobre la estabilidad se puede explicar porque ante una perturbación como viento lateral o inclinación de calzada, se transfiere peso desde la rueda cuyo ángulo de convergencia contribuye a la perturbación a aquella que la contrarresta. De no ser así, la no existencia de fuerzas laterales en el neumático implica un sistema inestable, y cualquier fuerza externa le hace perder la trayectoria recta. No obstante, se debe tener en cuenta que en caso de circular ambas ruedas de un mismo eje con convergencia no nula por zonas con distinto coeficiente de adherencia (una placa de hielo, etc.), se producirá un desplazamiento lateral del vehículo en la dirección de la rueda que circule por la zona que presente una mayor adherencia. Un segundo posible efecto positivo de un ángulo de convergencia distinto de cero es que este puede corregir una indeseada característica sobre o subviradora del vehículo. En concreto, un ángulo de convergencia negativo

contribuye a reducir el comportamiento subvirador, de la misma manera que un ángulo positivo reduce la tendencia a sobrevirar.

Por último, cabe mencionar que, en aquellos casos en que se decide optar por un ángulo de convergencia distinto de cero para lograr un determinado efecto positivo, se puede lograr reducir en parte los efectos negativos que este conlleva. Mediante la combinación adecuada de ángulos de convergencia y de caída se puede minimizar el efecto mencionado de desgaste no deseado debido al deslizamiento lateral, y mantener una buena estabilidad frente a perturbaciones laterales. Wei (Wei et al., 2005) desarrolla una expresión que relaciona ambos ángulos con el fin de obtener el mínimo deslizamiento lateral:

$$\alpha = \frac{2dLl}{r(4L+l)}\gamma + C \quad (2-1)$$

donde α es el ángulo de convergencia, d es el diámetro de la llanta, L es la batalla, l es la longitud de la huella del neumático, γ es el ángulo de caída, r es el radio en carga del neumático y C un coeficiente experimental.

2.2.2 Implicaciones de los desarrollos tecnológicos recientes

En las últimas décadas se ha experimentado una intensa evolución del sistema de dirección. Por ejemplo, la dirección asistida de tecnología hidráulica se ha usado mayoritariamente desde finales de los años 1960, pero en la actualidad se ve desplazada por otros sistemas de asistencia electro-hidráulica (sistema hidráulico, pero cuya bomba es movida por un motor eléctrico) o completamente eléctrica, por las ventajas que presentan, entre otras en cuanto a ahorro energético.

Otros avances, sin embargo, podrían tener implicaciones sobre la verificación de los ángulos de la dirección, por lo que se presentarán a continuación para comprender en qué modo estas tecnologías podrían influir en un correcto diagnóstico de la eficacia del sistema de dirección en el futuro.

Por ejemplo, la llamada “dirección dinámica” (Reuter & Ullmann, 2008) es capaz de modificar independientemente los ángulos de giro de cada rueda, por ahora en situaciones de emergencia, en combinación con el ESP (*“Electronic Stability Program”*). En vehículos equipados con este sistema, la medida de la alineación en parado no tiene por qué coincidir con la configuración que puede adoptar en determinadas condiciones de circulación.

El siguiente paso que se plantea de cara a aumentar la contribución de los ángulos de dirección a una conducción más segura consistiría en instalar actuadores como el de la Figura 2.10, capaces de adaptar en tiempo real los ángulos de convergencia y caída de cada rueda a las condiciones de la marcha, para optimizar así la transferencia de fuerzas a la carretera (Mori, 1996). Al conseguir ángulos de caída de hasta 20° , con estos dispositivos, todavía en estadio de prototipo, se lograría alcanzar aceleraciones laterales superiores a las de los turismos actuales. En este caso, la medida de la alineación en parado tendría aún menos relevancia, dado que la misma se vería modificada continuamente durante la conducción.



Figura 2.10 Mecanismo de dirección del prototipo Mercedes F400 (Fuente: Mercedes-Benz)

En general, es probable que en los próximos años se asista a una transición en la concepción del sistema de dirección de los vehículos, desde el control de una sola variable, como es el giro del volante, que solidariamente se traduce en un ángulo de giro fijo de las ruedas, hacia una contribución significativa a las prestaciones y seguridad de los automóviles. Para conseguirlo, el vehículo tendrá que interpretar las órdenes del conductor, tomando en consideración la información obtenida de diversas fuentes (sensores embarcados, GPS, etc.), y podrá actuar sobre más variables desacopladas, y no solo el giro solidario de ambas ruedas de un mismo eje.

Así, la evolución del sistema de dirección apunta, como sucede con muchos otros sistemas del automóvil, al “*X-by-wire*”, que aplicado al sistema de dirección se denomina “*Steer by wire*” (Yih, 2005)). Este término designa a una serie de tecnologías que buscan sustituir la transmisión mecánica (mediante mecanismos,

circuitos hidráulicos, etc.) de las órdenes del conductor por la transmisión por cables de señales eléctricas que representen más bien las intenciones de quien maneja el vehículo. La ventaja que presentan estas tecnologías “*by-wire*”, aparte del aumento de espacio habitable, y la reducción de coste de fabricación por menor trabajo de ensamblado en la línea de montaje final (ya que la conexión entre distintos subsistemas se limita a conectar cables), es una conducción más segura y eficaz. Este incremento en la seguridad y eficacia se produce debido a que en vez de disponer básicamente de cuatro variables para dirigir el vehículo (giro del volante, palanca de cambio, acelerador y freno), al pasar el control al propio vehículo, este dispondría de muchas más variables sobre las que actuar. Por ejemplo, para reducir la velocidad, además de actuar de forma independiente sobre los frenos de cada rueda, también puede hacer uso del motor o la suspensión o dirección activas, que pueden contribuir a mantener la estabilidad. Una parte nada desdeñable de la mejora en seguridad se debería a la reducción de la labor intelectual del conductor. Sin embargo, todos estos dispositivos en principio hacen más complicada la inspección técnica del vehículo que los elementos mecánicos tradicionales. Por el momento, su intervención se suele limitar a situaciones de emergencia, pero el simple hecho de existir implica un cierto riesgo de fallo, que, a su vez, puede causar un accidente. No obstante, en la aviación hace ya tiempo que no existe transmisión mecánica de órdenes, y la tasa de fallos es mínima, si bien es cierto que cuentan con redundancia de sistemas, a veces hasta triple, que difícilmente se podría implantar por coste en automóviles de turismo. A este respecto, cabe asimismo señalar que en la mayoría de turismos el pedal de acelerador ya es electrónico, y también se está empezando a usar esta tecnología para el pedal de freno (EBS: “*Electronic Braking System*”), sistemas estos que resultan críticos para la seguridad, por lo que no resultaría especialmente arriesgado confiar en un sistema “*by-wire*” para la dirección.

En todo caso, dado que este tipo de tecnologías no se han introducido todavía a los vehículos en producción, ni se contemplan en un futuro próximo, no se han considerado de cara a los objetivos de esta tesis.

2.2.3 Consecuencias de la dirección en mal estado

Son numerosas las razones que aconsejan tener correctamente ajustada la alineación de los vehículos, algunas de las cuales ya se han apuntado, para evitar las posibles consecuencias negativas que un ajuste inadecuado puede tener sobre la

seguridad vial y el medio ambiente. A continuación se citan las más importantes, y que constituyen motivo suficiente para que la verificación de la alineación sea un apartado imprescindible de la ITV.

Una consecuencia inmediata de un sistema de dirección mal ajustado es el desgaste irregular de neumáticos, que reduce la vida útil del mismo. Aunque sólo fuera por motivos económicos, sería rentable que los propietarios de vehículos revisaran la alineación regularmente. El periodo entre revisiones recomendable depende del diseño de cada vehículo, ya que algunos son robustos y prácticamente no necesitan corregir la alineación a lo largo de toda su vida útil, mientras que otros son delicados y necesitan revisarla cada año o 20.000 km, aunque se les dé un uso lo más cuidadoso posible.

En el estudio de Yamazaki (Yamazaki et al., 1989) se llega a la conclusión de que el desgaste de neumático guarda una estrecha relación con el ángulo de convergencia; así, por ejemplo, una variación de $0,2^\circ$ de ángulo de convergencia de una rueda implica un incremento de desgaste de casi 1 mm en la banda de rodadura al cabo de 1.200 km de circulación. Además, demuestra que, a igualdad de fuerza lateral (que se puede conseguir compensando el efecto de un ángulo de la alineación con otro), el desgaste se incrementa proporcionalmente al ángulo de convergencia; esto se explica por la mayor deformación y deslizamiento producido a causa de la convergencia. En concreto, se observa que para aumentar el desgaste debido al ángulo de caída en la misma proporción que el debido a la convergencia, se debe aumentar el ángulo de caída en una proporción mucho mayor.

Del desgaste de neumáticos deriva la consecuencia más peligrosa: el riesgo de accidente. Por el hecho de tener el neumático desgastado de forma irregular es más probable sufrir un reventón (como el que se observa en la Figura 2.11), con resultado más o menos grave. Sin llegar al reventón, la pérdida de adherencia, sobre todo en conducción sobre suelo mojado, es un importante factor de riesgo a tener en cuenta.

Existen numerosos estudios acerca de la influencia de los neumáticos en la seguridad vial. Por ejemplo, según el trabajo de Martin y Laumon (Martin & Laumon, 2005), de una muestra de 51.000 automóviles implicados en accidentes con daños materiales o corporales registrados en vías rápidas, un 8% había sufrido un reventón.



Figura 2.11 Neumático desgastado con reventón

En un estudio realizado en base a los datos de la Dirección General de Tráfico de España entre 2003 y 2007 (FESVIAL, 2009), se señala que el 62% de los accidentes debidos a defecto mecánico y el 1% de los siniestros mortales totales se deben a neumáticos en mal estado. En ese mismo estudio se ofrece el dato de una empresa concesionaria de autopistas que indica que en el año 2008 el 17% de los heridos graves y el 27% de los muertos se produjeron por causa de vehículos con problemas en los neumáticos, constituyendo así el factor de accidentalidad más importante en las autopistas tras la distracción y el sueño.

En otro estudio sobre el estado de los neumáticos en España (RACE & Goodyear, 2010), se indica que de los defectos detectados en accidentes con víctimas, los relacionados con los neumáticos representan 3 de cada 4. Por otro lado, en base a los resultados de inspecciones en las ITV, se estima que el 4% de los vehículos ligeros en circulación presentan defectos graves o muy graves en el apartado de neumáticos, lo que en cifras absolutas representa alrededor de un millón de vehículos. Un 35% de estos defectos consisten en el desgaste irregular excesivo de la banda de rodadura, una de cuyas causas más habituales es la incorrecta alineación del sistema de dirección.

Aparte del efecto pernicioso de una incorrecta alineación en el desgaste de los neumáticos, se debe tener en cuenta que cuando un turismo es homologado, supera una serie de ensayos en los que debe mostrar unas aptitudes dinámicas mínimas, como el ISO 4138 (Dixon, 1996), en el que el vehículo recorre una pista circular de radio no muy grande (unos 30 m), para que la máxima velocidad de paso por curva no implique efectos relevantes de las fuerzas aerodinámicas. En

estos ensayos se busca medir, entre otras, la máxima aceleración lateral que puede desarrollar el vehículo a examen, o la característica sobre o subviradora del mismo, incrementando progresivamente la velocidad y observando la tendencia a desplazarse de la trayectoria circular. Mediante la modificación de parámetros de la dirección, suspensión y neumáticos se establecen los ajustes que proporcionan las mejores cualidades dinámicas de estabilidad y adherencia del vehículo. Otros ensayos de homologación de similar principio se realizan a velocidad constante o con ángulo de giro del volante constante (Wong, 1993). Es importante destacar que este tipo de ensayos se realizan con el vehículo ajustado a un determinado ángulo de convergencia que, como se vio en el apartado 2.2.1.5, influye en la característica sobre o subviradora del vehículo, por lo que una variación en el ajuste respecto al ángulo recomendado podría hacer que el vehículo ya no fuera capaz de superar los ensayos de homologación.

En este sentido, se ha demostrado el deterioro de las prestaciones dinámicas de los vehículos cuando su ángulo de convergencia no está ajustado con arreglo a las instrucciones del fabricante. En el estudio realizado por García-Pozuelo (García-Pozuelo et al., 2007) se comprueba la considerablemente menor capacidad para llevar a cabo la maniobra de tipo “doble cambio de carril” (ISO-TR 3888-1) de un vehículo ajustado con un ángulo de convergencia inadecuado (en este caso, con ángulos positivos mayores a los recomendados). Este resultado se relaciona con el concepto de elipse de adherencia, que será tratado en el apartado 2.3.2, según el cual, el hecho de consumir la adherencia disponible en el neumático en una dirección (en el caso de un ángulo de convergencia distinto de cero, en dirección lateral), reduce la capacidad disponible para desarrollar fuerzas adicionales en esa misma u otra dirección. Además, en el caso de ángulos más positivos que los recomendados, se puede deber también al efecto subvirador que ocasiona la convergencia positiva, según se indicó anteriormente. En este mismo trabajo se encontró que un incorrecto ajuste del ángulo de caída ocasiona un deterioro mucho menor de las aptitudes dinámicas del vehículo.

Al margen de las consecuencias sobre la seguridad vial, como se mencionó también, un ángulo de convergencia distinto de cero aumenta la resistencia a la rodadura; llevado al extremo, con una convergencia de 90° , la rueda no giraría en absoluto, y la fuerza necesaria para mover el vehículo sería la correspondiente al deslizamiento puro entre neumático y suelo. Por lo tanto, existe igualmente un interés económico y ecológico en tener correctamente ajustada la alineación, para

no incrementar innecesariamente el consumo de combustible y, con ello, la contaminación atmosférica. Otras posibles consecuencias que pueden citarse, debidas a un inadecuado ángulo de convergencia son un mayor ruido de rodadura, o un deterioro prematuro del firme de la vía.

2.2.4 Relación con el sistema de suspensión

Los sistemas de suspensión y dirección de los vehículos se encuentran íntimamente ligados (Adams, 1993; SAE, 1998). La geometría de ambos sistemas los relaciona de manera que a lo largo del recorrido de la suspensión, van variando los distintos ángulos de dirección, el ancho de vía, etc. De hecho, se podría discutir si la alineación es un ajuste del sistema de suspensión o del de dirección. Una de las consecuencias es que para ajustar los ángulos de dirección hay que previamente ajustar la altura del vehículo a la que establece el fabricante en orden de marcha. En otras ocasiones se proporcionan los valores recomendados de los ángulos para distintas alturas del chasis. Otro ejemplo de la relación entre los dos sistemas es que, debido a la transferencia de carga que se produce al tomar una curva, la variación del recorrido de la suspensión puede ser aprovechada para colocar unos ángulos de dirección optimizados para tomar la misma (como por ejemplo una mayor caída negativa y una mayor convergencia positiva en la rueda exterior de un coche subvirador) (Remling, 1978).

Este efecto de la suspensión sobre los ángulos de dirección se puede cuantificar mediante coeficientes que expresan la variación de los dos ángulos más importantes: caída y convergencia (Dixon, 1996), con la distancia subida o bajada de la rueda respecto del chasis. Otro tipo de coeficientes describen la variación de estos mismos ángulos con la inclinación lateral del vehículo.

En este sentido, Mántaras (Mántaras, Luque & Vera, 2004) desarrolla un modelo cinemático de la suspensión tipo McPherson, que permite optimizar sus parámetros y los de la dirección con el objetivo de mejorar el comportamiento dinámico del vehículo, minimizando la variación de los ángulos de dirección a lo largo del recorrido de la suspensión.

En general, lo que se busca con el sistema de suspensión es obtener unas buenas características dinámicas y de seguridad para la conducción (Bastow, Howard & Whitehead, 2004). Algunas de las características deseables con respecto a la dirección son:

- Minimizar la variación de los ángulos de convergencia, caída, avance y salida al variar el recorrido de suspensión.
- Minimizar la variación del ancho de vía cuando varía el recorrido de la suspensión, reduciendo así las fuerzas laterales que esta variación provoca contra el suelo.

Estas características se pueden resumir en que los planos de las ruedas se mantengan paralelos a sí mismos al variar el recorrido de la suspensión, y describan únicamente un movimiento vertical.

Todavía hoy existe una intensa labor de investigación y desarrollo, que se ha venido llevando a cabo desde los inicios de la automoción, para encontrar sistemas de suspensión que proporcionen las mejores cualidades para dirigir el vehículo. La evolución a medio plazo, al igual que en el resto de funciones de automóviles, pasa por incorporar sistemas inteligentes con actuadores para ajustar en todo momento los parámetros de la suspensión. Según los diseñadores, se obtendrán fuerzas laterales hasta un 30% mayores que las actuales, y longitudinales un 15%. Este tipo de sistemas, claro está, tendrán más sentido en vehículos deportivos que pretendan velocidades de paso por curva altas, siendo de menor interés en turismos convencionales, aunque la aplicación en estos últimos redundaría en una mayor seguridad activa, ya que serían más tolerantes frente a velocidades inadecuadas de entrada en curva, o maniobras imprevistas y rápidas, por ejemplo, de evasión de obstáculos.

En definitiva, la contribución de la suspensión a la dinámica lateral es de compleja cuantificación, y se escapa de los límites de este trabajo, ya que a baja velocidad, y rodando sobre una superficie plana (que son las condiciones en que se desarrolla el ensayo de la ITV), sus efectos no son apreciables de cara al desplazamiento lateral registrado por la placa alineadora, al no producirse variaciones del recorrido de la suspensión.

Sin embargo, el efecto de la modificación del recorrido de la suspensión según los diferentes estados de carga de un vehículo en parado sí será tenido en consideración, en el apartado 5.4.7, que trata de la influencia de la masa sobre el ángulo de convergencia.

2.3 Interacción entre neumático y suelo

La interacción entre neumático y suelo es el único modo de conexión entre el vehículo y la vía, lo que implica que todas las fuerzas que actúan sobre el vehículo y las generadas por el conductor mediante la dirección o el acelerador y freno, se transmitan a través de esta interfaz, a excepción de la atracción gravitatoria y las aerodinámicas (Figura 2.12).

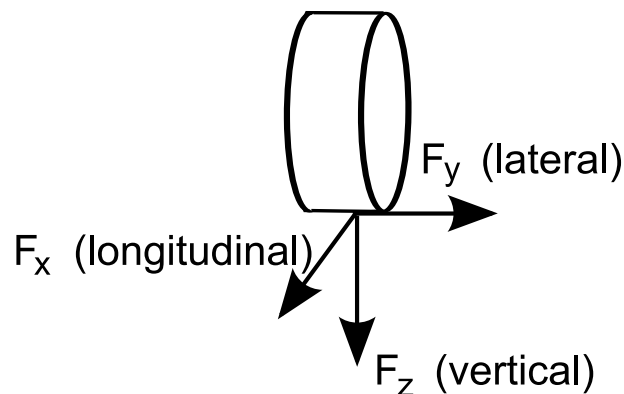


Figura 2.12 Fuerzas en el neumático

En cuanto al primero de los elementos del binomio, el neumático, aparte de su presión de inflado, su composición, y la forma y profundidad de su dibujo, cabe mencionar las características de guiado de capas y conicidad. Estos dos últimos factores pueden provocar una fuerza lateral durante la circulación, incluso para un neumático con ángulos de convergencia y caída cero (Pottinger, 1990). En el trabajo de Hall (Hall et al., 2003) se señala que los defectos de conicidad y guiado de capas en los neumáticos pueden llegar a equivaler, en cuanto a efectos, a convergencias de $0,4^\circ$. A continuación se detalla la influencia de estos defectos en el comportamiento del neumático:

- Guiado de capas, o alineación de cables (*“ply steer”* en inglés): En neumáticos radiales, los cables de las capas más externas del neumático no son perpendiculares al sentido de la marcha, sino que forman con el mismo un ángulo de unos 20° . Dichas capas son las que condicionan la fuerza lateral, y confieren estabilidad direccional al neumático. Este factor característico de los neumáticos no se puede considerar un defecto en sí, sino que lo es cuando existen diferencias entre ambos lados de un mismo eje. La magnitud de la fuerza lateral en circulación debida a este factor puede llegar a los 250 N (Dixon,

1996). Debido al guiado de capas en uno u otro sentido, el signo de la fuerza lateral producida en el contacto neumático-suelo dependerá del sentido de giro de las ruedas (hacia adelante o atrás).

- **Conicidad:** Esta componente de la fuerza lateral se debe a defectos de construcción de los neumáticos; principalmente, a que el cinturón no esté situado exactamente en el medio de la banda de rodadura, lo que hace que el neumático no se apoye como lo haría un cilindro, sino más bien como un cono. Por cada milímetro de descentrado del cinturón se pueden producir hasta 30 N de fuerza lateral, la cual es del mismo signo independientemente del sentido de giro, por lo que se puede distinguir fácilmente de la debida al guiado de capas con sólo invertir el sentido de giro en un ensayo de neumático. Con los sofisticados procesos de producción que se usan en la actualidad, el descentrado no suele superar los 3 mm.

Al igual que los neumáticos, el pavimento resulta de gran importancia para desarrollar la interacción entre ambos elementos. Por un lado, las distintas características del firme en sí, como la dureza, el drenaje, la micro y macro-textura. Y por otro, la presencia de suciedad, agua, hielo o nieve. Otros factores, como la temperatura de ambos elementos, y el coeficiente de rozamiento en seco, influyen también de manera determinante en la seguridad aportada por la interfaz entre neumático y suelo.

En los apartados siguientes se van a presentar brevemente algunos aspectos sobre los distintos conceptos que permiten entender una parte importante de los fenómenos que se desarrollan en la zona de contacto neumático-suelo. Se van a tratar únicamente los que influyen en las condiciones de la ITV, es decir, ensayo a velocidad reducida, en interior, a temperatura moderada, etc.

2.3.1 Huella de contacto

Cuando un vehículo se apoya en el suelo, los neumáticos se deforman al recibir el peso y, por lo tanto, pasan a tener un área de contacto, en lugar de una línea perpendicular al plano de la rueda, que sería lo que ocurriría en caso de no existir deformación de los mismos. Cada neumático deja una huella característica, no sólo por su dibujo, sino por la distribución de presiones a lo largo de la misma.

La superficie total de la huella de un turismo no resulta ser mayor que la de la palma de una mano, teniendo en cuenta las ranuras del dibujo. Sin embargo, a través de ella se tienen que transmitir las elevadas fuerzas verticales que soporta, y las importantes fuerzas horizontales (lateral y longitudinal), necesarias para controlar el vehículo. En la Figura 2.13 se observa la huella de contacto producida por uno de los neumáticos empleados en los ensayos.



Figura 2.13 Huella de contacto de uno de los neumáticos empleados.

Una gran parte de los avances que se producen en el diseño de neumáticos buscan mejorar la forma y características de la huella de contacto. El motivo principal para el predominio de los neumáticos radiales frente a los diagonales en turismos es precisamente la mejor distribución de fuerzas en esta huella (Milliken & Milliken, 1995), sobre todo a la hora de tomar curvas, donde las capas del cinturón del neumático se mantienen prácticamente paralelas al plano de la carretera, a pesar de la desviación del plano del neumático de la vertical.



Figura 2.14 Huellas de contacto para distintos neumáticos (Reimpell, Stoll & Betzler, 2000a)

Como en otros aspectos del automóvil, resulta complicado conseguir un compromiso y, dependiendo de las preferencias, se busca primar unas características frente a otras. Por ejemplo, los neumáticos de perfil bajo generan una huella más ancha que larga, apropiada para mejorar las prestaciones deportivas de los vehículos, pero que perjudican de forma considerable las prestaciones en calzadas con presencia de nieve. En la Figura 2.14 se pueden observar huellas de contacto para distintos tipos de neumático.

2.3.2 Mecanismos de producción de fuerza en el neumático

Debido a las características mecánicas tan especiales del neumático, diversos factores intervienen en la generación de las fuerzas que hacen posible controlar el vehículo. Estas fuerzas se originan por el hecho de que no exista desplazamiento relativo entre los tacos del neumático y el suelo en una parte importante de la huella de contacto debido a la adherencia entre ambos.

Fundamentalmente, existen dos mecanismos responsables de la fricción neumático-suelo (Gillespie, 1992):

- Por un lado, las fuerzas de adhesión, de carácter intermolecular, y que son las dominantes en condiciones de asfalto seco y limpio. Están relacionadas con la microtextura del pavimento, por lo que se asimilarían al rozamiento.
- Por otro, las fuerzas por histéresis del caucho por deformación, que juegan un papel más importante cuando la superficie no está limpia y seca, circunstancias en las que el rozamiento perdería relevancia, pero se mantendría un nivel de adherencia. Están relacionadas con la viscoelasticidad del neumático, y con la macrotextura del pavimento.

Ambos mecanismos de adherencia dependen del deslizamiento relativo entre neumático y suelo, que siempre se produce en cierta medida en circulación, de igual forma que siempre existe deformación del neumático, ya que esta es necesaria para que pueda desarrollar una fuerza contra el pavimento.

La adherencia total disponible para el neumático puede ser consumida en dirección longitudinal (aceleración o frenado) o transversal, o ambas simultáneamente. Los coeficientes de adherencia longitudinal y lateral no tienen por qué ser iguales dado que los neumáticos tienen dibujo y propiedades distintas en las dos direcciones (Milliken & Milliken, 1995), lo cual hace que los límites de

transmisión de fuerzas en ambas direcciones tampoco sean iguales. Además, es conocido que la transmisión de fuerza en una dirección limita la capacidad disponible para transmitir en la otra. Este hecho resulta de especial relevancia de cara al objeto de esta tesis; cuanto más alejado se encuentre el ángulo de convergencia de 0° , más fuerza lateral irá produciendo el neumático de forma continua al circular, por lo que, en caso de necesitar ejercer una fuerza longitudinal de frenado o aceleración, tendrá menor capacidad para desarrollarla que si no estuviese ya “consumiendo” parte de esa adherencia en sentido lateral.

Representando la capacidad de transmitir esfuerzos de un neumático en ambos sentidos se llega a obtener una forma como la de la Figura 2.15, llamada elipse de adherencia. Se denomina elipse ya que, normalmente, la capacidad máxima de transmitir esfuerzos es distinta en sentido longitudinal y transversal. En realidad, ni siquiera siempre es una elipse; en la práctica, la máxima fuerza longitudinal de frenado no suele ser de la misma magnitud que la de aceleración.

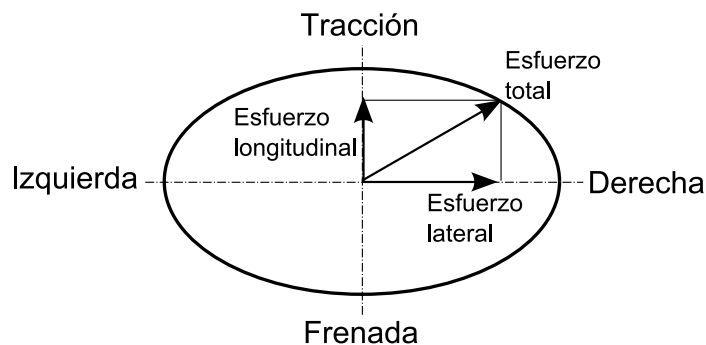


Figura 2.15 Elipse de adherencia

Los ángulos de alineación tienen influencia en los coeficientes y fuerzas de adherencia, ya que condicionan en gran medida la forma, situación relativa al vehículo y distribución de fuerzas de la huella de contacto.

2.3.2.1 Fuerza y deslizamiento longitudinales

La fuerza longitudinal, F_x , es proporcional al deslizamiento longitudinal, el cual se puede definir por el siguiente cociente:

$$i_x = \frac{V - \omega R}{V} \quad (2-2)$$

donde V es la velocidad lineal del vehículo, R el radio del neumático y ω la velocidad angular de la rueda. El fenómeno del deslizamiento se produce porque junto al par motor aplicado a la rueda, debido al peso se generan tensiones

tangenciales cuya resultante se opone al giro de la rueda, provocando la deformación del neumático; se comprime la banda de rodadura de este a la entrada de la zona de contacto, y se estira a la salida, de forma que un elemento circunferencial no deformado, de longitud Δl , cuando pasa a la zona de contacto habrá reducido su longitud $\Delta l \cdot (1 - \epsilon)$. Debido a esta deformación, el neumático actúa como si la longitud de la banda de rodadura fuera menor, que es lo mismo que si su radio fuese menor que el que corresponde a la rodadura libre; como resultado, la velocidad lineal V es menor que la teórica $\omega \cdot R$. Experimentalmente se comprueba que, aunque la distribución de presiones normales está desplazada hacia delante, la tensión tangencial presenta un pico en la parte trasera de la huella de contacto, que es precisamente donde se desarrolla el deslizamiento de mayor magnitud (Gillespie, 1992).

2.3.2.2 Fuerza lateral y deriva

La fuerza lateral desarrollada por un neumático, F_y , es aproximadamente proporcional al ángulo de deriva para ángulos pequeños (ver Figura 2.16), ya que cuando existe un ángulo de deriva, cada taco del dibujo en la zona estática de la huella de contacto (donde todavía no se produce deslizamiento) permanece unido al suelo, mientras que la base del taco se mueve prácticamente de manera solidaria con la llanta (en realidad la base del taco tampoco permanece en una posición estática respecto a la llanta, sino que el flanco también se deforma). Se produce, por lo tanto, una deformación del taco en la dirección transversal. La magnitud de esta deformación es proporcional al vector velocidad lateral y al tiempo durante el cual el taco permanece en contacto con el suelo. Dado que la velocidad lateral es proporcional a la velocidad absoluta de desplazamiento de la rueda y al ángulo de deriva, y que el tiempo de contacto es inversamente proporcional a la velocidad total, se puede concluir que la deformación lateral, y por lo tanto, la fuerza lateral es aproximadamente proporcional al ángulo de deriva, para ángulos pequeños (Rajamani, 2006).

En la Figura 2.16 se puede apreciar que la resultante de las fuerzas laterales que actúan en la huella de contacto se encuentra retrasada con respecto al eje Y, lo cual contribuye al denominado momento autoalineante (definido en el Anexo I). Por otro lado, siempre que exista un ángulo de deriva distinto de cero, se producirá un deslizamiento lateral en la zona posterior del neumático, donde la

banda de rodadura comienza a separarse del suelo, y retorna a la posición correspondiente al neumático sin deformación.

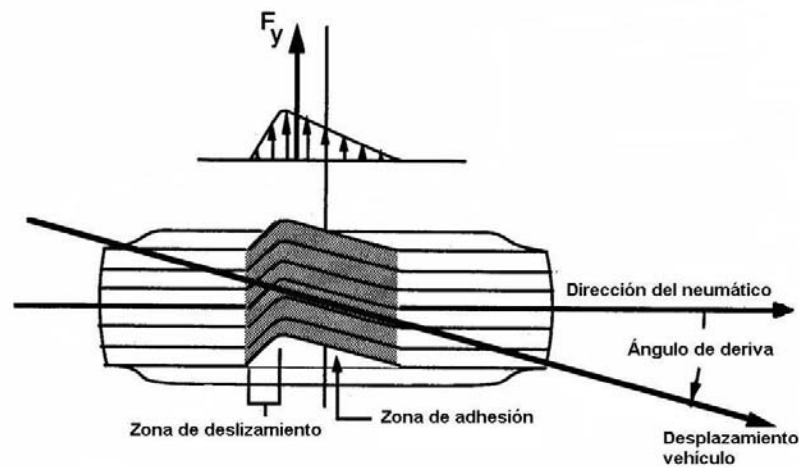


Figura 2.16 Deformación de la zona de contacto neumático-suelo (Gillespie, 1992)

Aparte de por un ángulo de deriva distinto de cero, que es el caso presentado en los párrafos anteriores, la fuerza lateral también puede ser producida por el ángulo de caída, o por las mencionadas anteriormente características del neumático de conicidad y guiado de capas.

En el caso especial de la medida con placa alineadora, el deslizamiento lateral se ve minimizado, ya que la placa tiene permitido el desplazamiento lateral. Esto hace que se anule el ángulo de deriva, pues en este caso la dirección del neumático prácticamente coincide con la de desplazamiento relativo del vehículo respecto de la placa móvil. De esta forma se puede concluir que el desplazamiento lateral medido mediante la placa alineadora no es debido tanto a una fuerza lateral al neumático (según el sistema de referencia SAE), sino más bien a la consecuencia geométrica del giro de la rueda en una dirección con componente en un plano perpendicular al plano medio del vehículo. No obstante, en el apartado 4.1.3 se verá que se produce una cierta fuerza lateral, necesaria para vencer la fuerza de rozamiento interno de la placa, y la producida por los muelles de centrado que contiene la placa.

2.4 Inspección del sistema de dirección

En la actualidad se dispone de distintos dispositivos para analizar la alineación de las ruedas de los turismos, dentro de la inspección del sistema de dirección, la cual incluiría también la inspección visual. Cada uno de estos dispositivos está orientado a un uso específico, por lo que son difícilmente comparables en cuanto a su utilidad. A continuación se presentan las principales características de cada una de las alternativas de dispositivos disponibles en el mercado, tras cuyo análisis se podrá determinar cuál es, hoy en día, el dispositivo más adecuado para llevar a cabo el diagnóstico de la alineación en las condiciones de la ITV.

2.4.1 Medidores de ángulos convencionales

Los medidores de ángulos convencionales son una serie de dispositivos con distintos niveles de complejidad, que necesitan un contacto directo con las llantas. Consisten normalmente en un conjunto de medición que se sujeta sólidamente a cada llanta por medio de garras, midiendo los ángulos que forman entre sí los planos de las cuatro ruedas y transmitiendo la información a una unidad central para procesado y visualización (Figura 2.17). Para ello utilizan distintas tecnologías, como láser, infrarrojos, niveles electrónicos, sensores ópticos, etc. En la unidad central cuentan con una base de datos que contiene los parámetros de la alineación recomendados por los fabricantes para los distintos modelos y variantes de vehículos.



Figura 2.17 Medidor de ángulos convencional

Aunque estos instrumentos no son los que se utilizan durante el proceso de inspección técnica periódica, debido a que necesitan de un tiempo largo de operación, ofrecen una información más precisa de los ángulos de dirección que la placa alineadora. Su uso resulta casi obligado en las bancadas de vehículos accidentados, donde se tiene que verificar en qué medida se ha deteriorado el estado de la alineación, y devolver a los elementos del vehículo su forma original, así como su posterior inspección. Igualmente son usados durante las revisiones periódicas de la alineación en los talleres de reparación y mantenimiento.

En los últimos años, el avance de la tecnología electrónica e informática ha conseguido que los aparatos medidores de ángulos alcancen un nivel de perfeccionamiento que les permite obtener unos valores de ángulos de dirección con una precisión de hasta la centésima de grado. Sin embargo, una medida tan precisa puede ser discutible en cuanto a su utilidad, ya que una fuerza lateral sobre el neumático de una magnitud tan pequeña como 5 N es capaz de alterar en varias centésimas de grado la alineación de la rueda, debido a los ya mencionados elementos elásticos (principalmente “*silent-blocks*”) que incorporan los sistemas de dirección y suspensión de los turismos, por lo que la “alineación exacta” no es posible de alcanzar en la realidad; se puede ajustar la alineación, recorrer una pequeña distancia, y al medirla de nuevo no se obtendrá el mismo resultado. De cara a reducir esta variabilidad, en los manuales de instrucciones de este tipo de medidores (Focus - 1, 2000) se indica que antes de iniciar la verificación de la alineación de un vehículo es necesario:

- Controlar y, en su caso, eliminar holguras de la suspensión y tirantes de dirección.
- Verificar y, en su caso, eliminar posibles endurecimientos o partes cedidas de los órganos elásticos de las suspensiones.
- Regular la presión de los neumáticos al valor previsto por el fabricante.
- Posicionar y repartir las eventuales cargas previstas por el fabricante.

Se recomienda además hacer rebotar brevemente los amortiguadores, para que alcancen una posición de equilibrio lo más próxima posible a la altura de chasis normal.

2.4.2 Medidores de ángulos 3D

Como evolución de los medidores de ángulos convencionales, en la actualidad también existen una serie de dispositivos, denominados “medidores de ángulos 3D”, capaces de medir con gran exactitud los ángulos de alineación a partir de una referencia externa, y no ya de la posición relativa de las cuatro ruedas entre sí (Figura 2.18).



Figura 2.18 Medidor de ángulos 3D Hunter DSP600

En este caso, lo que se coloca solidariamente a la llanta es una “diana” pasiva (ver Figura 2.19), menos vulnerable a daños, y cuya posición es captada desde la unidad central y, a partir de ella, se obtiene la posición y orientación de la rueda en el espacio. La operación de colocación de las dianas es similar a los medidores convencionales, por lo que los tiempos de operación también son altos.



Figura 2.19 Detalle de la diana del medidor Hunter DSP600

Otros dispositivos más avanzados realizan la medición mediante la adquisición de imágenes de la proyección de haces de láser sobre los neumáticos y llantas para, tras un procesado, obtener la posición tridimensional exacta de todos sus puntos y, por lo tanto, los ángulos de dirección. Reciben el nombre genérico de “*Non-Contact Alignment machines*”, N.C.A., (dispositivos medidores de alineación sin contacto físico). Un ejemplo es el mostrado en la Figura 2.20.



Figura 2.20 Medidor de ángulos Bepco NCA-200



Figura 2.21 Robot de ajuste de convergencia Bepco Probo

Estos últimos presentan la ventaja de su gran rapidez y, por lo tanto, productividad, pero dado su elevado precio no son viables actualmente para las estaciones de ITV ni para los talleres de reparación, sino, sobre todo, para el final de las líneas de montaje de los constructores de vehículos. Su integración en la

línea de montaje permite el ajuste final del ángulo de convergencia, que puede ser realizado por un operario, o bien mediante el uso de robots específicos, como el mostrado en la Figura 2.21.

2.4.3 Placa dinamométrica

Existe una serie de dispositivos que no miden directamente los ángulos de alineación, sino sus resultados: la fuerza lateral que producen en las ruedas, en el caso de la placa dinamométrica, o el desplazamiento lateral, en el caso de las placas alineadoras convencionales; estas últimas serán tratadas en el apartado siguiente.

Muñoz (Muñoz, 2001) diseña un prototipo de placa dinamométrica equipada de varias células de carga que registran las fuerzas producidas en el contacto neumático-suelo, así como un modelo de comportamiento de dicha placa.

García-Pozuelo (García-Pozuelo, 2008) desarrolla en su tesis doctoral un método de inspección de la alineación de turismos basado en la medición de la fuerza lateral producida en el contacto entre neumático y suelo. Se utiliza una placa dinamométrica que permanece en todo momento unida solidariamente al suelo, sobre la que pasa rodando una de las ruedas del vehículo a velocidad reducida, de forma idéntica a como lo haría sobre el alineador al paso. Lo que se registra en este instrumento es la fuerza lateral máxima desarrollada por el neumático, que resulta ser prácticamente constante a lo largo del ensayo, ya que no se permite la relajación de las tensiones acumuladas en el neumático con anterioridad a su entrada a la placa. Precisamente se debe asegurar que el vehículo haya rodado una distancia suficiente para que estas tensiones hayan llegado a desarrollarse en su totalidad antes de entrar en la placa (esta distancia se denomina “longitud de relajación”). En su trabajo, García-Pozuelo desarrolla también un criterio de rechazo de los vehículos en la ITV en base al cociente entre la fuerza lateral y la vertical desarrolladas por el neumático, magnitud a la que denomina “adherencia lateral”.

Se comparará la eficacia de este dispositivo con la placa alineadora en el Capítulo 6, así como la posibilidad de aplicar los resultados obtenidos de la medida de la fuerza lateral mediante una placa medidora de desplazamiento, dado que este es el dispositivo que ya se encuentra actualmente instalado en todas las ITV.

2.4.4 Medidores de desplazamiento lateral

Los medidores de desplazamiento lateral son un tipo de dispositivo de verificación de la alineación de vehículos que se basa en el fenómeno siguiente: en un eje que presenta una convergencia total del eje positiva, ambas ruedas tienden a rodar en dirección al plano medio del vehículo, hasta encontrarse (o separarse, en caso de convergencia negativa). Los distintos elementos que componen el sistema de dirección y suspensión del vehículo fijan las ruedas solidariamente al chasis, y las impiden que varíen su posición relativa, por lo que ese teórico desplazamiento se transforma en deslizamiento lateral de los neumáticos sobre el suelo. Cuando se permite que el suelo se mueva en dirección lateral, se evita en gran medida el deslizamiento lateral del neumático, y así el desplazamiento teórico que experimentarían las ruedas si no estuvieran sujetas al chasis, es transmitido al suelo, donde es medido.

Se han desarrollado dos tipos de equipos para medir el desplazamiento lateral: uno en el que las ruedas se colocan sobre rodillos que pueden desplazarse lateralmente, y otro en el que el vehículo pasa rodando sobre una placa que tiene permitido el desplazamiento lateral.

2.4.4.1 Medidor de rodillos

Este tipo de medidores de desplazamiento (Figura 2.22), que no ha pasado del estadio de prototipo, consta de un sistema de rodillos con el movimiento de traslación lateral permitido (además del de rotación de cada rodillo). Frente a las placas alineadoras convencionales, este dispositivo permitiría unas instalaciones más compactas, ya que el vehículo no se desliza durante la medida. Además, se podría incorporar a la instalación del frenómetro, ya presente en las estaciones ITV.

Nozaki (Nozaki, 2006) estudia la viabilidad de este dispositivo, y realiza ensayos experimentales sobre un prototipo. En su trabajo, desarrolla un modelo que relaciona el desplazamiento lateral de los rodillos con el ángulo de convergencia. Para determinar el desplazamiento debido a la tensión acumulada por la rodadura del neumático previa a la entrada a los rodillos (S_l), momento en que se relajaría en esta magnitud, propone la expresión siguiente:

$$S_l = \left(\frac{K \cdot \alpha}{L_f} \right) \cdot \cos \alpha \quad (2-3)$$

donde K representa el coeficiente de rigidez a convergencia, α el ángulo de convergencia y L_F la rigidez lateral del neumático. Dado que este prototipo no cuenta con un elemento anterior de relajación, esta ha de realizarse en el mismo elemento de medida.

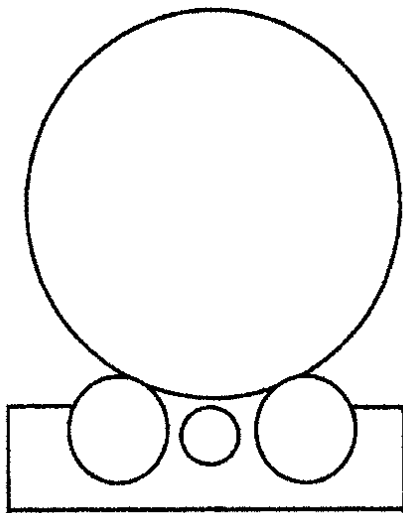


Figura 2.22 Medidor de rodillos (Nozaki, 2006)

Para el desplazamiento debido ya al ángulo de convergencia, una vez relajadas las tensiones previas, Nozaki propone la expresión siguiente:

$$S_2 = 2\pi R \cdot n \cdot \tan \alpha \quad (2-4)$$

donde S_2 es el desplazamiento debido al ángulo de convergencia, una vez que las tensiones pre-existentes en el neumático han sido relajadas. R es el radio del rodillo, y n es el número de rotaciones efectuadas durante la medida. Como se verá, esta expresión es análoga a la utilizada para el cálculo de la desviación lateral en alineadores al paso convencionales.

Los resultados obtenidos por Nozaki indican, sin embargo, que la correlación entre el desplazamiento lateral del rodillo y la convergencia es peor que en el caso de una placa alineadora convencional, debido a que la superficie curva del rodillo modifica la huella de contacto del neumático respecto a la que tendría en la circulación sobre el suelo liso. Además, los rodillos no pueden tener un desplazamiento lateral infinito, lo que hace que al cabo de varias vueltas de la rueda ya no se pueda medir el mismo, al haber hecho tope. En consecuencia, el desarrollo de estos medidores no ha tenido continuación.

2.4.4.2 Placa alineadora convencional

Las placas alineadoras convencionales, como la mostrada en la Figura 2.23, también reciben el nombre de placas de dirección, o alineadores al paso.



Figura 2.23 Utilización de placa alineadora en ITV

El uso de los alineadores al paso surgió, en la primera mitad del siglo XX, de la necesidad de cuantificar de un modo rápido y aproximado la correcta o incorrecta alineación del sistema de dirección. Como se ha indicado, han aparecido con posterioridad otros instrumentos extremadamente precisos para la medición de los ángulos, pero todavía sigue siendo necesario un método robusto y rápido para comprobar la alineación de los vehículos, por ejemplo en el transcurso de la ITV.

El alineador al paso consiste en una placa horizontal, instalada al mismo nivel que el suelo que la rodea, y que tiene permitido el movimiento en la dirección transversal al sentido de la marcha del vehículo. Dispone de un sensor que mide el máximo desplazamiento que llega a experimentar la placa, y que es traducido a metros de desplazamiento lateral por cada kilómetro que el vehículo recorriese en dirección longitudinal (m/km), medida que habitualmente recibe el nombre de “desviación lateral”, D_l . Normalmente cuenta con unos muelles de escasa rigidez, que devuelven la placa a su posición central una vez realizada la medida.

La primera referencia encontrada sobre la utilización de estos dispositivos se remonta a 1924 (Skinner, 1924), con un principio de funcionamiento análogo al actual, aunque con un sistema de transmisión mecánica de la medida a una serie de relojes (Figura 2.24).

March 25, 1924.

R. L. SKINNER

1,487,759

VEHICLE WHEEL GAUGE

Filed Sept. 18, 1919

2 Sheets-Sheet 1

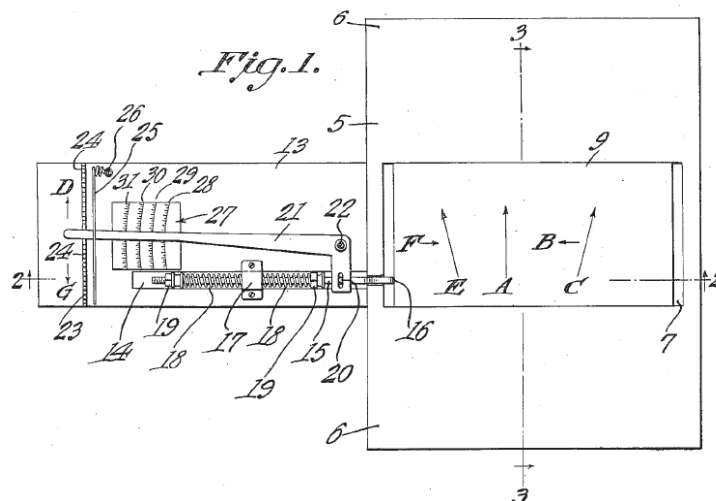


Figura 2.24 Esquema de la patente original de R.L. Skinner (Skinner, 1924)

En 1934 se patenta un sistema similar (Musselman, 1934), esta vez ya con transmisión eléctrica de la señal de desplazamiento al dispositivo de visualización (Figura 2.25).

March 13, 1934.

H. E. MUSSELMAN

1,950,994

WHEEL ALIGNMENT TESTING DEVICE

Filed March 2, 1931

3 Sheets-Sheet 1

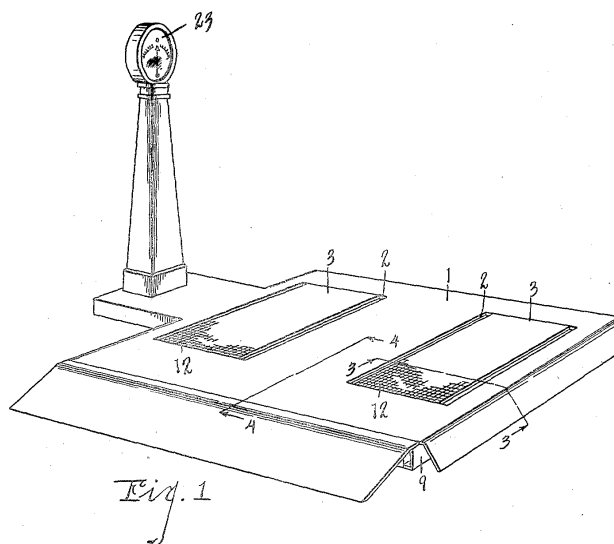


Figura 2.25 Esquema de la patente de H.E. Musselman (Musselman, 1934)

En esencia, los alineadores al paso posteriores (ver Figura 2.26) han supuesto una continuación del patentado por Musselman, aunque con el tiempo se han ido introduciendo mejoras al método (Colarelli & Marting, 1992). Una de ellas

consiste en la medida de la velocidad de paso para descartar medidas por una velocidad inadecuada que pudiera causar un desplazamiento adicional de la placa por inercia una vez pasada la rueda. Otra forma de mejora es la “relajación” de las tensiones laterales presentes en el neumático antes de la medida, generadas entre otros por el ángulo de convergencia, y que ya han alcanzado su máximo con anterioridad a la entrada en la placa, produciendo la máxima compresión de los elementos elásticos de la suspensión (silent-blocks, etc.). La utilidad de una placa de “relajación”, previa a la placa de medida, será analizada en el Capítulo 4, donde se revisarán también en detalle otros aspectos de su funcionamiento.



Figura 2.26 Alineador al paso de la década de 1960 (Fuente: The Rotarian)

A pesar del uso extensivo de este instrumento para la medida de la desviación lateral, no existe una abundante bibliografía que lo estudie. Dentro de la misma, cabe citar un estudio realizado por el fabricante de equipos Hunter (Hunter Co., 1990), en que se barajan posibles alternativas a la disposición tradicional de las placas alineadoras convencionales, como añadir una segunda placa debajo de la rueda opuesta del mismo eje. Se llega a la conclusión de que la mejor correlación entre desviación lateral del eje y ángulo de convergencia es la que se da con la configuración habitual de una sola placa de medida. Una vez confirmado este punto, se realizaron ensayos con varias decenas de vehículos distintos, resultando que la medida de placa alineadora ofrece una adecuada repetibilidad.

En definitiva, la placa alineadora es el equipamiento más adecuado para llevar a cabo la verificación de la correcta alineación de los vehículos y, como tal, es el utilizado actualmente en las estaciones ITV. Por una parte, se encuentra

dentro del listado de equipos con que obligatoriamente tiene que contar cada estación, y por otra, el Manual de Procedimiento establece que se debe utilizar este dispositivo durante la inspección del sistema de dirección de los turismos. Sin embargo, actualmente no existe en España un criterio establecido sobre los valores que constituyen un defecto en sí mismos y los que no, por lo que a pesar de que la utilización de la placa es obligatoria, se podría afirmar que la utilidad que se está obteniendo de la misma no es toda la que podría ofrecer. Por este motivo surge la necesidad de la presente tesis, que pretende poner en valor la placa alineadora según los objetivos que se detallan a continuación.

Capítulo 3 Objetivos

Teniendo en cuenta lo expuesto en el Capítulo 2, el principal objetivo que se pretende conseguir con la presente tesis doctoral es desarrollar mejoras en la metodología de inspección del sistema de dirección de vehículos automóviles de tipo turismo en la ITV, mediante el instrumento que actualmente se encuentra instalado en todas las estaciones ITV: la placa alineadora, la cual se encuentra en cierto modo infrautilizada, ya que su medida no se utiliza por sí sola como criterio de calificación de defectos. De las distintas alternativas que se planteen, se elegirá la más adecuada para proponer un nuevo criterio claro y objetivo de aceptación o rechazo de vehículos, en virtud de la alineación de su sistema de dirección.

Para lograr este objetivo, resulta imprescindible analizar los fundamentos en que se basa la medida de desviación lateral en el ensayo con placa alineadora. Se hace también necesario estudiar experimentalmente los factores que pueden tener una influencia sobre el resultado de la medida mediante dicho dispositivo, lo que posibilitará el desarrollo de un modelo que permita estimar la desviación lateral que corresponde a unos determinados ajustes de la alineación.

Como objetivo adicional, se pretende comparar las medidas realizadas mediante la placa alineadora y una placa dinamométrica, para obtener la relación existente entre ambas. En base a esta relación, se podrá plantear uno de los criterios de inspección, que tenga en cuenta el deterioro de las aptitudes dinámicas del vehículo por un incorrecto ajuste de la alineación.

Capítulo 4 Funcionamiento de la placa alineadora

En este capítulo se analizan los aspectos fundamentales en que se basa el método de medición de la desviación lateral de los ejes de vehículos mediante el alineador al paso, así como su ejecución práctica, particularizando para el caso concreto de la placa utilizada en los ensayos experimentales de esta tesis. Algunos de los desarrollos realizados no habían sido hasta el momento tratados en la literatura científica.

4.1 Principales características

La placa alineadora utilizada para la presente tesis es el modelo Tractest de la marca Hofmann, integrada en una línea de ITV completa Hofmann Safelane 800, la cual se encuentra instalada en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III (Figura 4.1). Esta placa es un ejemplo típico de las utilizadas en las ITV.

El dispositivo está compuesto por la placa de medida, de 0,5 m de longitud, y de una placa anterior de relajación, con movimiento independiente, de longitud

0,2 m (Figura 4.2). La anchura de ambas es de 0,6 m, y están separadas entre sí 2 mm.



Figura 4.1 Placa alineadora utilizada en los ensayos

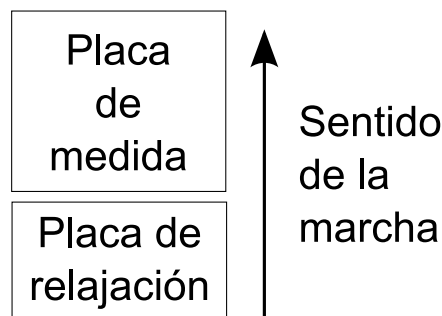


Figura 4.2 Esquema de la placa alineadora

Los límites de desplazamiento lateral de la placa son de ± 10 mm, que equivalen a desviaciones laterales de ± 20 m/km. Estos límites corresponden en todo caso a ángulos de convergencia que se encuentran dentro de la zona en que su influencia sobre el comportamiento lateral del neumático es lineal (Cebon, 1999; Pacejka, 2002). Además, este rango de ángulos incluye ampliamente los máximos y mínimos recomendados encontrados en la bibliografía para vehículos de turismo (que se presentan en el apartado 7.4.1), por lo que son suficientes para el propósito de la presente tesis. Una medida por encima de este rango de desplazamientos laterales siempre será claramente indicativa de un desajuste de la alineación.

4.1.1 Detalles constructivos

En la Figura 4.3 se puede observar la estructura interior de la placa alineadora utilizada en los ensayos experimentales de esta tesis doctoral, que es

similar a la de cualquier placa alineadora actual. Estas placas se componen de un bastidor fijo, que se encastra en el suelo sobre el que van a rodar los vehículos. Sobre dicho bastidor fijo se monta otro móvil para la placa de medida, normalmente unido mediante guías lineales, que permiten únicamente el movimiento en dirección transversal. Se suelen instalar topes de recorrido ajustables para el movimiento transversal del bastidor móvil que, entre otros, evitan que se dañe el sensor de desplazamiento.



Figura 4.3 Mecanismo interno de una placa alineadora

Entre ambos bastidores se sitúa un sensor de su desplazamiento relativo. Se usan distintos tipos de sensores: inductivos, encoders, etc., siendo un requisito importante su robustez. Para el caso concreto de la placa utilizada en los ensayos, su sensor de desplazamiento es un sensor de proximidad inductivo Telemecanique XSC-H203629, que mide el desplazamiento de la pieza metálica que se observa en la Figura 4.4. Por otro lado, en la Figura 4.5 se presenta la curva característica de medida de este sensor.

Sobre el bastidor móvil se instala a ras de suelo la placa propiamente dicha, sobre la que ruedan los vehículos, y que debe disponer de la suficiente rigidez, así como de una rugosidad adecuada para asegurar un buen contacto con los neumáticos. En caso de contar con placa de relajación, como sucede en la instalación utilizada en esta tesis, esta comparte el bastidor fijo (el que está unido al suelo) con la de medida, y su construcción es idéntica, excepto por su longitud inferior, y por no contar con un sensor de desplazamiento.



Figura 4.4 Detalle del sensor de proximidad inductivo

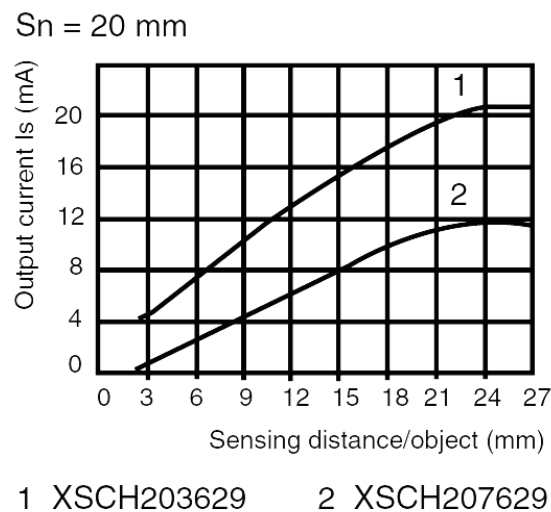


Figura 4.5 Curva característica del sensor de la placa alineadora (Fuente: Telemecanique)

Opcionalmente, las placas pueden contar con sensores de tipo conmutador, que detectan la entrada y salida de la huella del neumático en la placa, situados inmediatamente antes de la placa de relajación y después de la de medida, como es el caso de la placa empleada en los ensayos. Estos sensores permiten obtener información adicional sobre las medidas.

4.1.2 Muelles de centrado

Si bien se ha desarrollado algún prototipo de placa alineadora con un sistema para devolver la placa a su posición central tras la medida mediante un dispositivo eléctrico, hidráulico o neumático, lo más habitual (por economía y robustez) es que la placa retorne al punto de cero desplazamiento lateral mediante la acción de un par de muelles, cada uno de ellos actuando por compresión

solamente en uno de los sentidos de desplazamiento (Figura 4.6). Debido a la construcción de las placas alineadoras, puede existir una pequeña zona alrededor de la posición central en que ninguno de los muelles actúe, aunque esta situación puede corregirse mediante un ajuste previo de la compresión de los muelles. Además, el hecho de que la placa no se encuentre en la posición de desplazamiento cero cuando el neumático entra en la misma se puede obviar fácilmente si la unidad de procesamiento del equipo toma como cero de la medida la posición que ocupa la placa cuando el neumático activa el conmutador de entrada en la misma. Del mismo modo, puede que un incorrecto ajuste de la precarga de los muelles haga que ambos estén ejerciendo una fuerza sobre la placa en la posición de centrado, pero la consecuencia sería únicamente una mayor facilidad para mover la placa a partir del centro, hasta que deja de estar en contacto uno de los muelles. Habitualmente la constante elástica de los muelles de centrado es de escasa magnitud, ya que no tienen que vencer un rozamiento elevado de la placa sobre el bastidor.

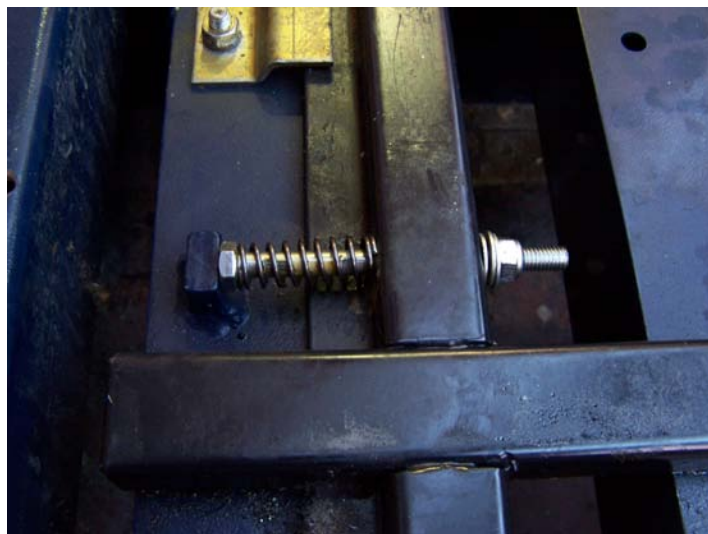


Figura 4.6 Uno de los dos muelles de centrado de la placa alineadora

Se han estudiado específicamente los muelles empleados por la placa utilizada en esta tesis, determinando el valor de su constante elástica mediante ensayos de compresión, ya que este dato va a ser empleado en el desarrollo de los nuevos criterios de inspección presentados en el Capítulo 7. En la Figura 4.7 se presentan los resultados de dos ensayos distintos para cada uno de los dos muelles, con sus correspondientes rectas de ajuste, donde M1: muelle 1, E1: ensayo 1, etc..

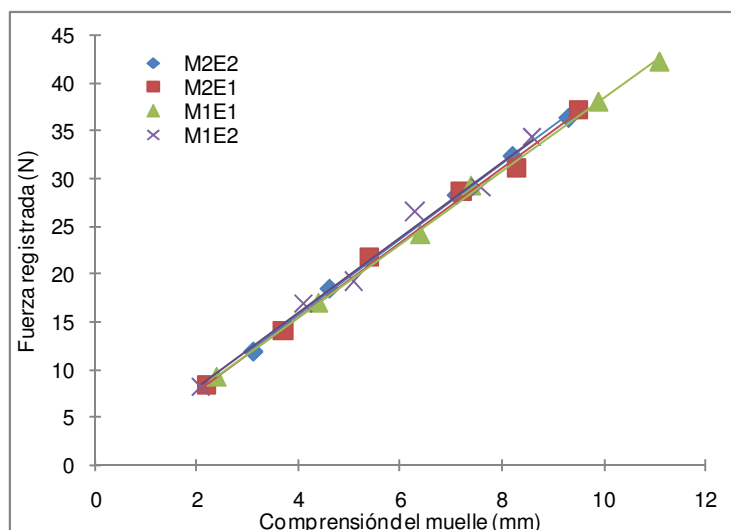


Figura 4.7 Relación fuerza-elongación del muelle

En la Tabla 4-1 se muestran las pendientes de las cuatro rectas de ajuste halladas, que corresponden a la constante elástica, según la expresión siguiente:

$$F_m = K_m \cdot d_l \quad (4-1)$$

donde F_m es la fuerza ejercida por el muelle, K_m es la constante elástica del mismo y d_l el desplazamiento lateral de la placa, de igual magnitud que la compresión del muelle en cuestión. Se encuentran acompañadas del error en el ajuste por el método de mínimos cuadrados.

Tabla 4-1 Cálculo de la constante elástica de los muelles

Muelle 1	Constante elástica (N/mm)	Muelle 2	Constante elástica (N/mm)
Ensayo 1 (M1E1)	$3,83 \pm 0,07$	Ensayo 1 (M2E1)	$3,90 \pm 0,13$
Ensayo 2 (M1E2)	$3,94 \pm 0,07$	Ensayo 2 (M2E2)	$3,96 \pm 0,21$
Media:	3,8851	Media:	3,9268
Error Accidental:	0,0563	Error Accidental:	0,0314

Como resultado de los ensayos realizados, se ha obtenido un valor de constante elástica de los muelles de la placa utilizada de $3,89 \pm 0,06$ N/mm para el Muelle 1 y $3,93 \pm 0,17$ N/mm para el Muelle 2.

Dado que, como se ha indicado en este mismo apartado, el desplazamiento máximo de la placa está limitado a 10 mm hacia cada lado, la fuerza máxima desarrollada por cada uno de estos muelles es de $39,0 \pm 0,3$ N. Esta fuerza será

empleada por el modelo de desviación lateral que se desarrollará en el apartado 5.4.8.

4.1.3 Caracterización de la relación Fuerza-Desplazamiento lateral

Aparte del valor de la fuerza ejercida por los muelles, el neumático que rueda sobre la placa también debe vencer un cierto nivel de fuerza de rozamiento entre el bastidor móvil de la placa y el fijo. Este rozamiento, no obstante, tiene una positiva función amortiguadora sobre la oscilación de la placa en torno a su posición de centrado, generada por los muelles. Para evaluar la fuerza lateral total (muelles más rozamiento) ejercida por el neumático sobre una placa alineadora, se ha realizado en el laboratorio el ensayo consistente en desplazar la misma ejerciendo tracción, registrando simultáneamente los valores de fuerza lateral, mediante una célula de carga, y desplazamiento lateral mediante el propio sensor de la placa.

En la Figura 4.8 se puede observar el comportamiento típico de la fuerza lateral (F_y) frente al desplazamiento (d_l) en una placa alineadora. En la parte izquierda de la figura se encuentran los datos obtenidos directamente del ensayo, y en la derecha una representación esquemática de los mismos de forma generalizada. Hasta ahora no se había estudiado en la bibliografía esta curva característica de funcionamiento de los alineadores que, como se puede comprobar en la figura obtenida, se asemeja a un comportamiento típico de histéresis. En la representación gráfica se pueden distinguir las siguientes zonas (Figura 4.8-b):

- a) Aumento progresivo de la fuerza, con desplazamiento cero, hasta alcanzar el valor de la fuerza de rozamiento (F_{roz}).
- b) Una vez superado el rozamiento estático, comienza a desplazarse la placa, y a ejercer la fuerza de centrado del muelle, con la pendiente que viene dada por la constante de rigidez del muelle (K_m), anteriormente calculada.
- c) Constituye el tope de desplazamiento de la placa, por lo que la fuerza ejercida ya no se traduce en desplazamiento adicional.
- d) Para que la placa retorne a su posición central, se va reduciendo la fuerza que es necesaria para mantenerla alejada, hasta que la fuerza ejercida por el muelle es suficiente para vencer el rozamiento.

- e) Al acercarse a su posición de centrado, el muelle ejerce cada vez menos fuerza, hasta que el desplazamiento se hace cero.

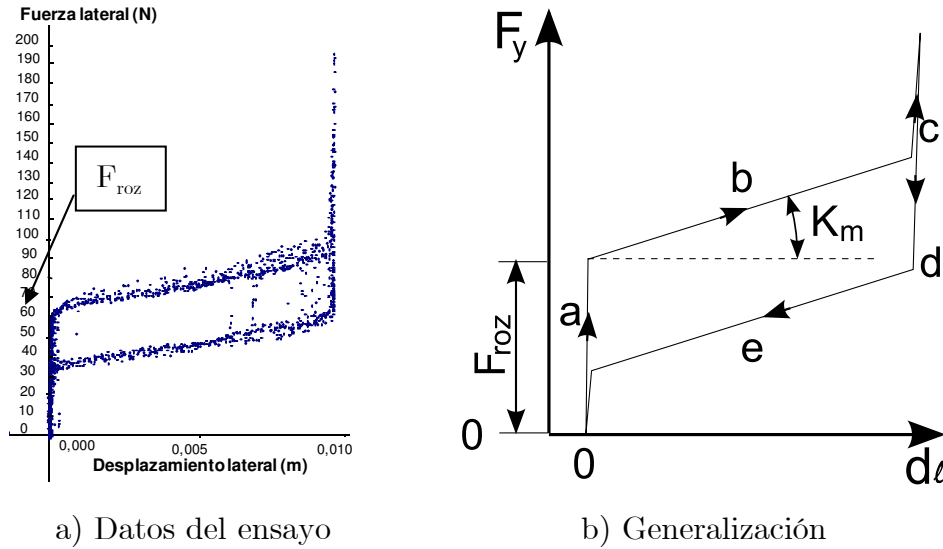


Figura 4.8 Curva característica Fuerza-Desplazamiento

La fuerza necesaria para superar el rozamiento estático de la placa alineadora se ha cuantificado de esta forma en 60 N. Esta fuerza es, en todo caso, superior a la componente transversal a la trayectoria del vehículo de la resistencia a la rodadura registrada en las condiciones de ensayo en la ITV (en las que la presión del neumático es la adecuada, y el ángulo de convergencia y la velocidad reducidos), por lo que se puede afirmar que el desplazamiento lateral de la placa no se debe a la resistencia a la rodadura. Mediante la placa dinamométrica, usada también en los ensayos, se ha comprobado que la fuerza de resistencia a la rodadura es de unos 50 N. En la bibliografía consultada se apunta a valores similares. Gillespie (Gillespie, 1992) proporciona la siguiente expresión para la resistencia a la rodadura:

$$R_r = F_z \cdot f_r \quad (4-2)$$

donde R_r es la fuerza de resistencia a la rodadura, F_z es la fuerza vertical que soporta cada rueda, y f_r es el coeficiente de resistencia a la rodadura, que en las condiciones de los ensayos se puede considerar como 0,015.

Cabe señalar que cuanto mayor es la fuerza de rozamiento necesaria para provocar el desplazamiento inicial de la placa alineadora, la medida de desviación lateral proporcionada por la misma es de peor calidad. Esto es así porque la placa no registra ningún desplazamiento lateral hasta que el neumático ha recorrido una

mayor longitud sobre la misma, para un rango mayor de ángulos de convergencia, constituyendo así una indeterminación en la relación entre el ángulo de convergencia y la desviación lateral. Sin embargo, placas con reducido rozamiento permiten el desplazamiento lateral desde los momentos iniciales de entrada del neumático en la placa, incluso para ángulos de convergencia próximos a cero, siendo la fuerza ejercida por los muelles la componente principal de la fuerza total de la placa. Lógicamente, cuanto mayor es la longitud de la placa, menor es la influencia, sobre la medida, de la fuerza de rozamiento que es necesario vencer al inicio de la rodadura del neumático sobre la misma.

4.1.4 Placa de relajación o compensación

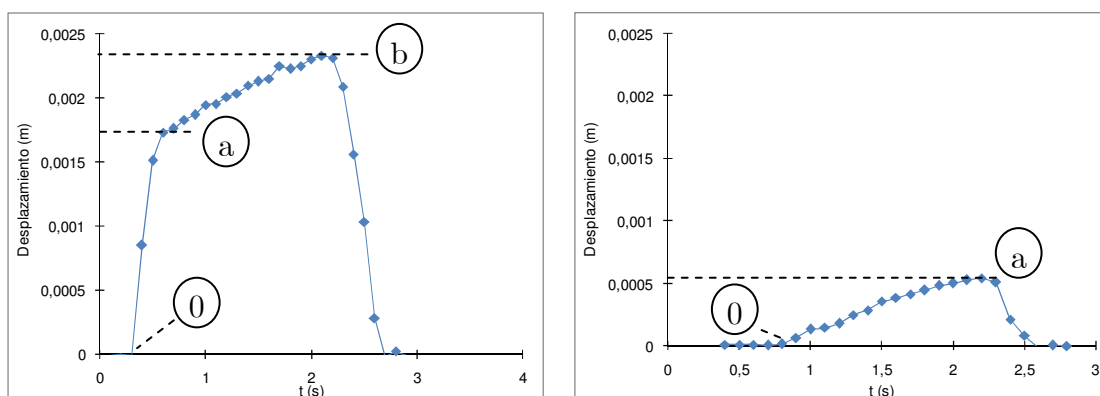
Durante el proceso de rodadura de un vehículo con ángulo de convergencia distinto de cero sobre un suelo rígido se van generando fuerzas laterales en el contacto entre neumático y suelo que, a su vez, producen la deformación del neumático hasta llegar a un máximo. Normalmente, además de la deformación del neumático se deforman también otros elementos elásticos del sistema de suspensión-dirección, produciéndose como resultado una variación del ancho de vía efectivo del eje y del propio ángulo de convergencia. En el momento en que el vehículo pasa de rodar por un suelo rígido a una placa alineadora, que tiene la posibilidad de desplazarse lateralmente, se produce una “relajación” de las deformaciones acumuladas tanto en el neumático como en los otros elementos flexibles, así como la restitución del ancho de vía, resultando un pronunciado desplazamiento inicial de la placa.

Es habitual que los alineadores al paso dispongan de un primer tramo de placa independiente del que tiene el sensor de desplazamiento, para descargar en él el desplazamiento inicial, y eliminar así cualquier otra fuerza existente entre el neumático y el suelo antes de la medida. Este tramo previo se denomina “placa de relajación o compensación”, y mediante el mismo se favorece la fiabilidad y repetibilidad de los resultados de la medida mediante placa alineadora. En la Figura 4.1 se muestra dónde se sitúa este tramo, en la placa utilizada en los ensayos.

Sin embargo, si este desplazamiento inicial debido a las tensiones acumuladas se produce directamente sobre la placa de medida, todavía es posible disminuir su influencia sobre el resultado, ya que se puede tomar como “cero” de la medida la posición tras el pronunciado desplazamiento inicial. Por lo tanto, es

posible conseguir un efecto similar a la placa de relajación mediante la utilización de un algoritmo adecuado en el dispositivo de procesamiento de la placa.

Dentro de los trabajos realizados en esta tesis, se han estudiado experimentalmente las diferencias existentes entre la medida de desplazamiento efectuada mediante un dispositivo con placa de relajación, y en otro sin ella, aspecto este que no ha sido tratado todavía en la bibliografía. La Figura 4.9-a presenta el registro de desplazamiento obtenido en un ensayo sin placa de relajación. En ella, el desplazamiento inicial se produce desde el punto de desplazamiento **0** hasta el punto **a**. Del punto **a** al punto **b**, el desplazamiento se debe a la rodadura sobre la placa. En la Figura 4.9-b, correspondiente a un ensayo en las mismas condiciones pero con placa de relajación previa, el neumático ya entra en la placa de medida sin tensiones ni deformaciones previas, y con el ancho de vía restituido, por lo que el desplazamiento registrado por la placa es únicamente el debido al efecto de la convergencia, siendo el desplazamiento desde el punto de desplazamiento **0** hasta el punto **a** en este caso, equivalente al **a-b** del caso anterior.



a) Sin placa de relajación

b) Con placa de relajación

Figura 4.9 Medida de desplazamiento lateral con y sin placa de relajación

Así pues, si la longitud de la placa de medida es corta, el desplazamiento inicial tiene una contribución relativa elevada respecto del desplazamiento total registrado. Sin embargo, al aumentar su longitud, la magnitud del desplazamiento inicial se hace menos relevante frente al desplazamiento total. Por este motivo, resulta más importante la existencia de la placa de relajación en alineadores de escasa longitud, mientras que no es raro encontrar alineadores largos y sin placa de relajación en las ITV, dado que presentan la cualidad de ser más robustos en cuanto a su construcción.

Una característica adicional de la existencia de una placa de relajación es que al necesitar menos recorrido lateral de la placa de medida, es posible mantener una holgura más reducida entre los bordes laterales de la placa y el suelo circundante, con la consiguiente mejora de la seguridad de uso.

Como es lógico, la placa de relajación debe tener una longitud superior a la de la huella del neumático, para desarrollar efectivamente su función, ya que mientras una parte de la huella está en contacto con el suelo fijo, el neumático hace de ligadura entre el suelo y la placa, impidiendo el desplazamiento libre de esta.

4.2 Obtención de la desviación lateral

El principio de la medida mediante placa alineadora se basa en registrar el máximo desplazamiento lateral de la placa, que sería asimilable a la desviación de la línea recta que sufriría una de las mitades laterales del eje medido de un vehículo circulando en línea recta, si su efecto no fuese contrarrestado por la otra mitad. La componente principal de este desplazamiento respecto a la dirección longitudinal del vehículo es la debida a la dirección del plano de la rueda, cuando ambas no son paralelas, es decir, la convergencia. En este caso, la trayectoria que seguiría la rueda, de estar libre del chasis, sería oblicua al plano medio del vehículo. Una rueda con un cierto ángulo de caída también tenderá a separarse de la línea recta, al igual que una que sufra de defectos de conicidad o guiado de capas, pero la influencia de estos factores, como se comprobará experimentalmente en el Capítulo 5, es menor. Por este motivo, se denomina habitualmente a la alineación simplemente “paralelismo”, aparte de que, como se ha indicado, dado que el ángulo de convergencia es el único parámetro que se puede modificar en la mayoría de los vehículos, la verificación de la alineación se limita normalmente a la convergencia.

El mencionado desplazamiento lateral de la placa es debido al alto grado de acoplamiento entre la misma y el neumático, por la existencia entre ellos de un coeficiente de rozamiento suficiente para desarrollar una fuerza superior a la que ejercen los muelles de centrado, una vez superado el rozamiento inicial de la placa. Por ejemplo, en un caso desfavorable, con un coeficiente de rozamiento entre placa

y neumático $\mu=0,5$, y una fuerza normal sobre el mismo $N=2000$ N, se tendrían hasta 1000 N ($F= \mu \cdot N$) de fuerza disponibles entre neumático y placa, que es muy superior a la fuerza que pueden ejercer los muelles de centrado de la placa en su desplazamiento máximo. De esta forma, la placa sigue en gran medida el desplazamiento impuesto por la dirección de movimiento del neumático. Este desplazamiento registrado por la placa alineadora experimenta un incremento continuo desde la entrada del neumático en la placa hasta su salida. Esto se debe a que el movimiento relativo de las ruedas de un eje con convergencia, de no estar sujetas al chasis, tiene una componente transversal a la placa que hace que esta se desplace indefinidamente mientras el neumático siga rodando sobre ella, y no exista ningún tope a su recorrido.

Las medidas de desplazamiento provenientes de los ensayos realizados para la presente tesis se han obtenido en función del tiempo. Por este motivo las gráficas obtenidas del registro de desplazamiento de la placa no son perfectamente lineales, ya que los ensayos se han realizado en las mismas condiciones que en una línea de estación ITV real: es el conductor del vehículo el que intenta mantener una velocidad constante de paso por la placa.

A continuación, se indica la metodología seguida para el análisis de los datos de medida de desplazamiento lateral, hasta obtener el resultado de desviación lateral de un eje.

En la Figura 4.10 se muestra un ejemplo de ensayo de medida de desplazamiento lateral de la placa alineadora en función del tiempo, para la que se han realizado 10 repeticiones. Esta medida corresponde, así mismo, al ensayo 1 de la Tabla 4-2. Se toma como medida de desplazamiento lateral de cada una de las repeticiones el valor máximo (en valor absoluto) de desplazamiento registrado por el equipo, ya que este es el desplazamiento producido a lo largo de toda la longitud de la placa. Estos valores máximos son los que se recogen en la Tabla 4-2, como resultado de cada repetición. La tarea de obtener el valor de la medida se puede automatizar mediante un sencillo algoritmo. En caso de observar que el valor registrado por el sensor de la placa es distinto de cero en los momentos previos a la entrada de la rueda, se puede tomar ese valor como cero de la medida.

Una vez obtenido el valor de desplazamiento de cada una de las repeticiones de un ensayo, se calcula la media de los valores de las distintas repeticiones para obtener el resultado final de la medida. En la Tabla 4-2 se presentan los valores de

desplazamiento (en mm) de distintas repeticiones de un grupo de ensayos. Para el Ensayo 1, que corresponde al conjunto de repeticiones mostradas en la Figura 4.10, se obtiene una media de desplazamiento lateral de la placa de -6,55 mm, con una desviación estándar de 0,10 mm.

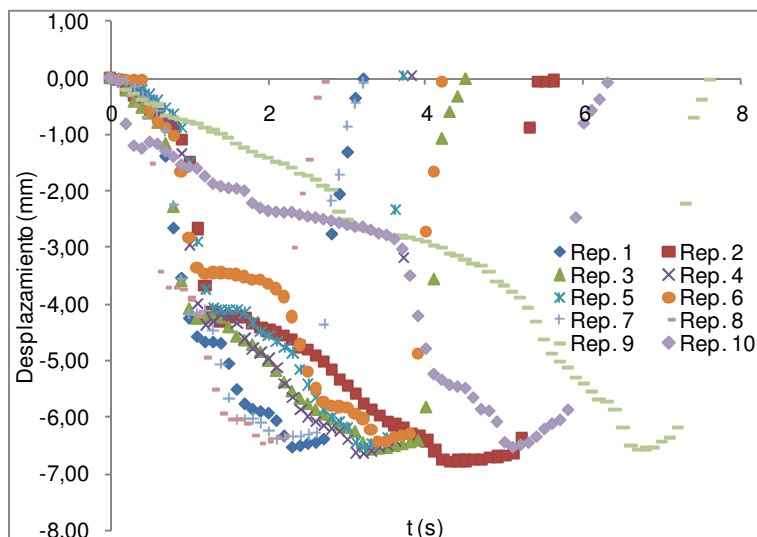


Figura 4.10 Serie de repeticiones de un ensayo de medida de desplazamiento

Tabla 4-2 Conjunto de repeticiones de distintos ensayos de desplazamiento lateral en placa alineadora

Repet.	Desplazamiento lateral (mm)										Media	Desv. Est.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Ens. 1	-6,54	-6,78	-6,57	-6,65	-6,54	-6,43	-6,40	-6,46	-6,58	-6,55	-6,55	0,10
Ens. 2	-5,37	-5,47	-5,32	-5,49	-5,15	-5,23	-5,18	-5,21	-5,36	-5,30	-5,31	0,11
Ens. 3	4,22	3,62	3,56	3,35	3,44	3,47	3,20	3,29	3,59	3,32	3,50	0,27
Ens. 4	2,49	2,89	2,64	2,39	2,56	2,32	2,51	3,21	2,69	2,63	2,63	0,25
Ens. 5	7,67	8,36	7,96	7,75	8,38	7,45	7,41	8,27	7,45	7,07	7,78	0,43
Ens. 6	-7,42	-7,48	-7,42	-7,17	-7,30	-7,48	-7,60	-7,36	-6,68	-7,05	-7,30	0,25
Ens. 7	-8,64	-8,84	-8,54	-7,60	-7,70	-7,70	-8,29	-8,00	-8,00	-8,15	-8,15	0,40
Ens. 8	6,53	6,18	6,27	5,84	5,40	5,47	6,40	5,99	5,50	5,89	5,95	0,38
Ens. 9	4,48	5,55	5,60	4,83	4,76	5,19	4,52	5,23	4,64	4,32	4,91	0,43
Ens.10	-5,02	-4,87	-5,25	-5,29	-5,52	-5,01	-4,85	-5,28	-4,31	-4,99	-5,04	0,32
Ens.11	3,10	3,70	3,39	3,98	3,36	3,40	3,03	3,06	4,63	3,29	3,49	0,47

A continuación de obtener el desplazamiento lateral de la placa, se procede al cálculo de la desviación lateral del eje en sí. La medida de la desviación lateral es una magnitud relativa: representa la distancia que las ruedas de un eje habrían recorrido en dirección lateral si el vehículo hubiese circulado una cierta distancia en su dirección de marcha. En consecuencia, la indicación que dan los alineadores

al paso se encuentra habitualmente en m/km (en el Sistema Internacional), por lo que estos tienen que transformar el desplazamiento lateral medido en la placa, que tiene una cierta longitud, en el que habría registrado en caso de tener la placa una longitud de 1 km. Para llevar a cabo esta transformación, en base al esquema de la Figura 4.11 se puede desarrollar la siguiente expresión que permite obtener la desviación lateral de un eje, D_l , como resultado de la medida de desplazamiento lateral registrado por la placa en los ensayos:

$$D_l = \frac{d_l}{L_{placa}} \times 1000 \quad (4-3)$$

donde L_{placa} es la longitud de la placa, y d_l el desplazamiento lateral registrado al cabo de esa longitud (encontrándose ambos en las mismas unidades). Esta expresión será la empleada para obtener las medidas de desviación lateral en capítulos posteriores.

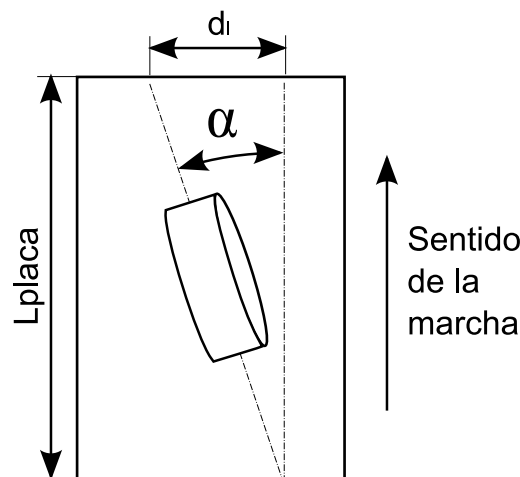


Figura 4.11 Esquema de medida de desplazamiento con placa alineadora

4.3 Estudio de las trayectorias de las ruedas

Para analizar adecuadamente los desplazamientos experimentados en los ensayos, se han registrado y estudiado las trayectorias seguidas por las huellas de contacto de ambas ruedas del eje que se va a medir mediante placa alineadora, en función del ángulo de convergencia individual de cada una. Este conocimiento permitirá comprender mejor el fundamento en que se basa la medida con placa alineadora. El procedimiento seguido para ello ha consistido en impregnar

continuamente la banda de rodadura del neumático con polvo de tiza, y medir las sucesivas posiciones de una referencia del neumático en el suelo (ver Figura 4.12). Cabe señalar que este análisis de las trayectorias no se ha realizado hasta el momento en la bibliografía.

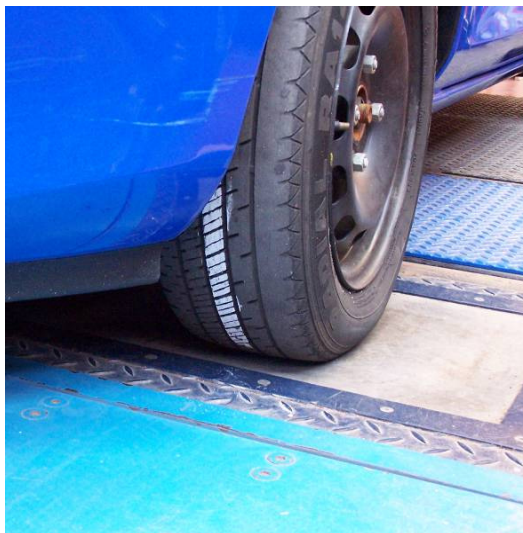


Figura 4.12 Procedimiento de registro de las trayectorias

Se han estudiado y se presentan a continuación los casos en los que se tiene un ángulo de convergencia distinto en cada rueda y en los que existe el mismo ángulo en las dos, para llegar a una conclusión general válida para cualquier ángulo. En cada uno de estos casos se ha analizado la trayectoria de la rueda que pasa sobre la placa alineadora, tanto respecto a la placa, como al suelo fijo, y la de la rueda opuesta respecto al suelo, además del desplazamiento de la propia placa alineadora respecto al suelo.

El estudio se ha realizado sobre un alineador al paso que dispone de placa de relajación. Para el caso en que no la tuviera, el desarrollo es análogo, con la salvedad de que el desplazamiento lateral deja de tener una discontinuidad entre el de la placa de relajación y la de medida.

En el primero de los casos analizados (Figura 4.13) se ha ajustado una convergencia cero en la rueda que no pasa sobre la placa (la rueda izquierda), y una convergencia positiva de $1,25^\circ$ en la rueda que pasa sobre la placa (la rueda derecha). Para que se mantengan estos ángulos al empezar a moverse el vehículo, se debe sujetar firmemente el volante en su posición centrada ya que, de otro modo, la convergencia tendería a repartirse a partes iguales en ambas ruedas.

Al igual que se hará para los dos casos siguientes, en la mitad izquierda de la Figura 4.13 se presenta una vista en planta de la instalación del alineador, situado longitudinalmente sobre la dirección de marcha del vehículo. Sobre la vista en planta se han representado, mediante líneas de puntos, las trayectorias de ambas ruedas respecto al suelo fijo, y mediante línea discontinua la trayectoria seguida por la rueda que pasa sobre el alineador, respecto a este. En la mitad derecha se muestra un gráfico con el desplazamiento registrado por ambas placas sucesivamente (la de relajación y la de medida) frente a la distancia recorrida según el sentido de avance del vehículo. Este gráfico esquemático se ha construido a partir de los datos medidos por la placa alineadora, como por ejemplo los mostrados en la Figura 4.14, correspondiente a un ensayo de este primer caso. En concreto, el desplazamiento lateral real de la placa que se observa en la Figura 4.14, obtenido en condiciones de velocidad no uniforme, se idealiza mediante la línea recta del tramo 2-3 de la Figura 4.13, asumiendo una velocidad constante. La escala lateral de las líneas que representan las trayectorias seguidas por las ruedas se ha magnificado para una mejor apreciación.

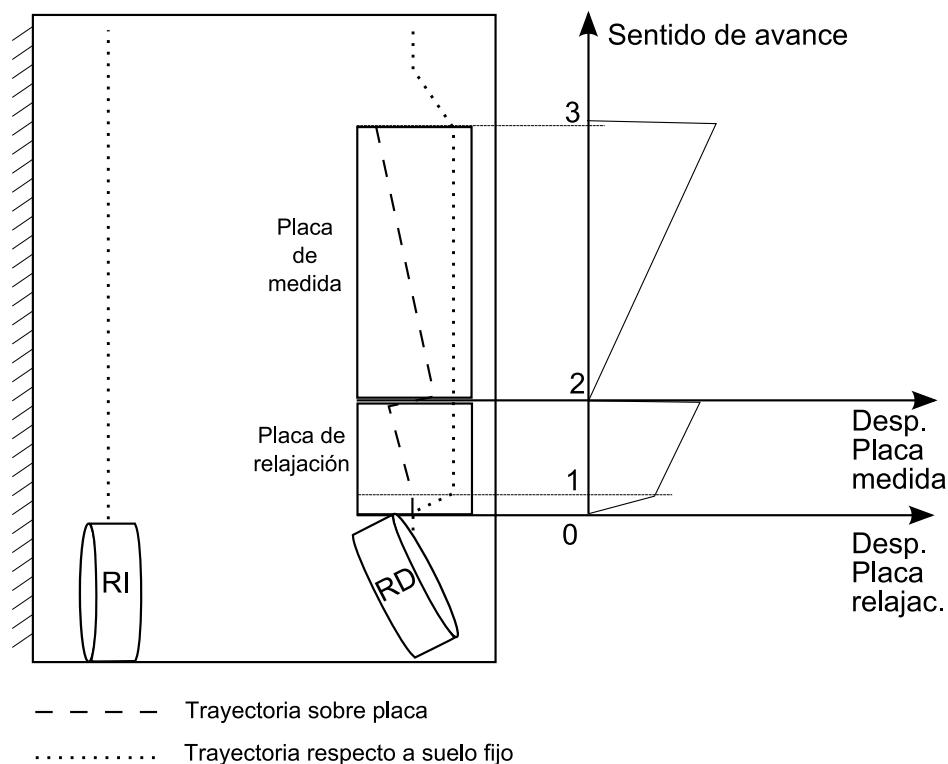


Figura 4.13 Desplazamiento Caso 1: convergencia 1,25° en rueda de placa

El proceso de avance del vehículo a lo largo de la línea de inspección, rodando sobre la placa alineadora, se produce de la manera que se describe a

continuación, a partir del esquema de la Figura 4.13: justo antes de entrar en la placa, la rueda izquierda (en adelante RI) tiende a circular en línea recta, mientras que la derecha (RD) ejerce en el suelo una fuerza lateral hacia la derecha, que tiende a desplazar el vehículo hacia la izquierda. En el punto 0 del recorrido, la RD entra en contacto con la placa de relajación, con lo que se produce una liberación de las tensiones acumuladas, tanto en la deformación de los neumáticos, como en otros elementos elásticos de la suspensión, ensanchándose también la vía, y desplazando la placa hacia la derecha. En el punto 1, la relajación ya ha finalizado, y se comienza a producir un desplazamiento de la placa en menor proporción, debido únicamente al ángulo de convergencia a partir de este punto. En el punto 2 la rueda pasa de la placa de relajación a la de medida. Como se puede observar, la pendiente del gráfico de desplazamiento lateral en el segundo tramo de la placa de relajación es similar a la que se registra en la de medida. En el punto 3 la RD abandona la placa alineadora, con lo que esta retorna a su posición de centrado, a la vez que la rueda vuelve a producir las deformaciones que resultan en un estrechamiento de la vía, debido a la convergencia total del eje positiva. En este caso, por lo tanto, el desplazamiento de la placa se genera únicamente debido a la acción de la RD, que pasa sobre la placa.

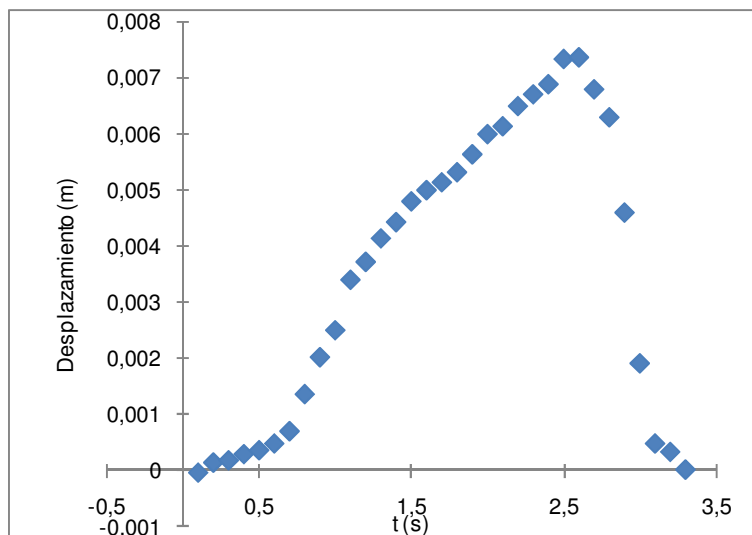


Figura 4.14 Registro de desplazamiento de la placa de medida para el primer caso estudiado

En un segundo caso, se analiza la situación en la que la RD tiene convergencia cero, mientras que la RI presenta convergencia positiva (Figura 4.15). Al igual que en el caso anterior, es necesario sujetar firmemente el volante para que la convergencia no se reparta entre ambas ruedas.

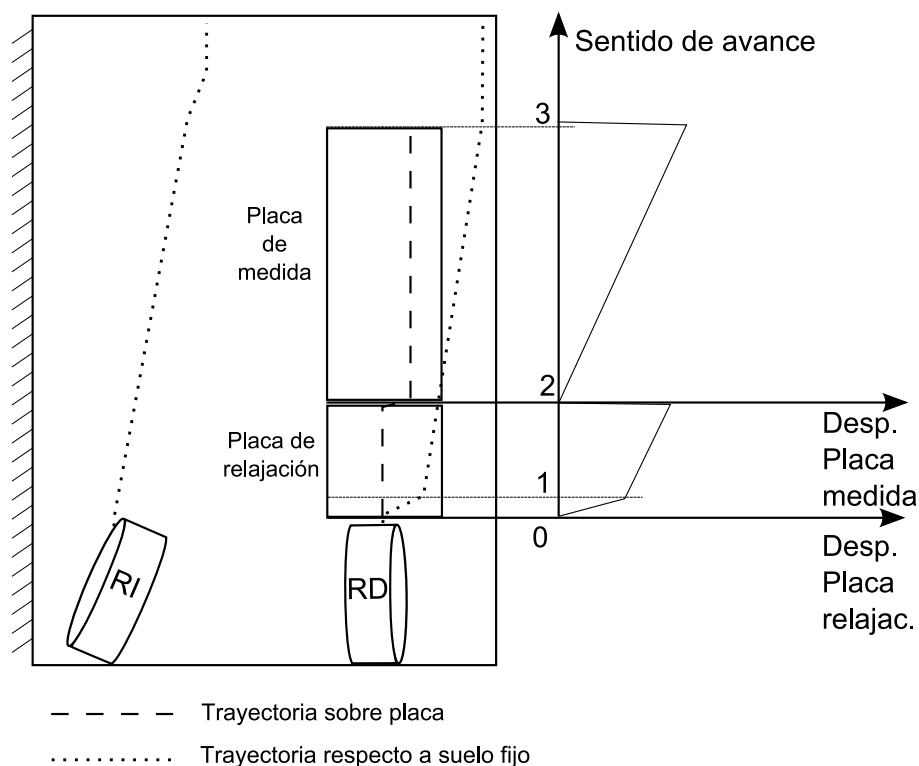


Figura 4.15 Desplazamiento Caso 2: convergencia $1,25^\circ$ en la rueda opuesta

En esta situación, es la RI, que no pasa por la placa, la que provoca el desplazamiento de esta, “empujando” a la RD. En el momento anterior a la entrada en la placa, la RI ejerce una fuerza lateral hacia la izquierda que tiende a desplazar el vehículo hacia la derecha. En el momento 0, la RD libera sobre la placa alineadora las tensiones acumuladas en el eje por haber rodado sobre el suelo fijo. A partir del punto 1 la RI tiende a seguir la trayectoria marcada por su ángulo de convergencia, y dado que la RD no es capaz de ejercer una fuerza lateral de reacción que se oponga, por estar sobre un suelo móvil, la RI la obliga a desplazarse solidariamente con la placa hacia la derecha, mientras que la trayectoria de RD respecto de la placa es una recta. En el punto 2 se produce el paso de RD de la placa de relajación a la de medida, originándose un desplazamiento de esta con la misma pendiente que la del último tramo de la de relajación. En el punto 3 la RD abandona la placa, y por efecto de RI se comienza a acumular otra vez deformación en los neumáticos y elementos elásticos, reduciendo la vía a su valor de circulación.

Por último, el caso en que tanto RD como RI se reparten el ángulo de convergencia total (es decir, $0,625^\circ$ de convergencia en cada rueda), constituye una superposición de los dos anteriores, como se puede comprobar en la Figura 4.16.

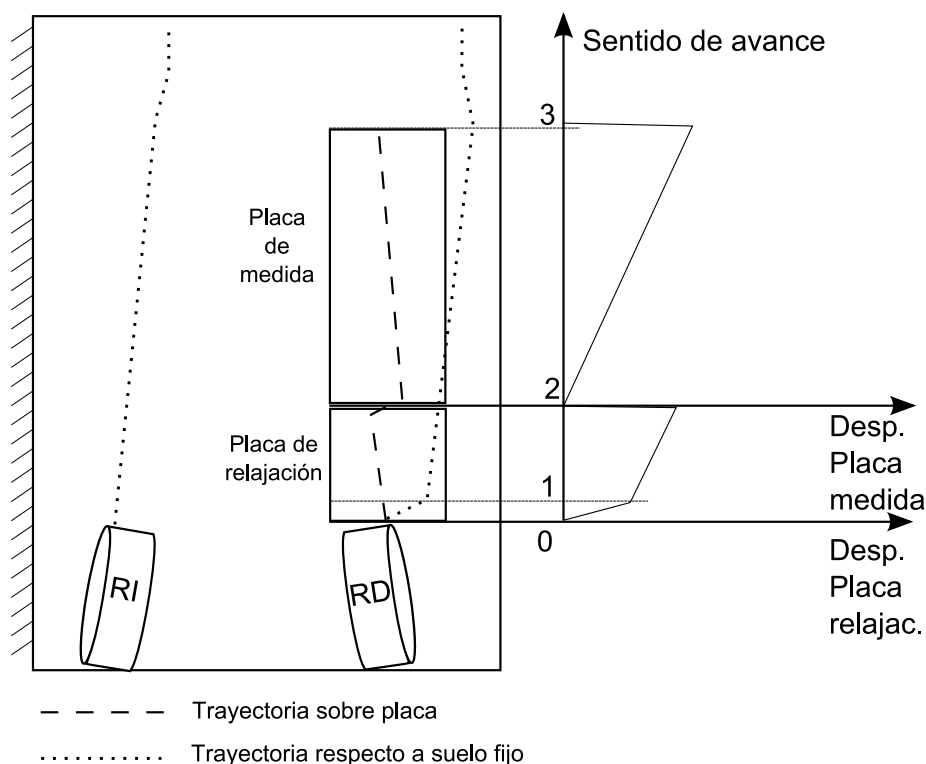


Figura 4.16 Desplazamiento Caso 3: convergencia total 1,25°, repartida en ambas ruedas

En este caso, tanto la RD como la RI contribuyen al desplazamiento de la placa, cada una según el mecanismo visto en cada uno de los casos aislados anteriores. Las trayectorias seguidas, tanto respecto al suelo fijo como a la placa, se encuentran a medio camino entre las de los dos casos aislados. Sin embargo, las gráficas de los desplazamientos sufridos por la placa alineadora son idénticas en los tres casos, independientemente del ajuste individual de cada rueda. Este hecho muestra que el resultado de la medida con placa alineadora es una indicación de la convergencia total del eje. Así, se ha observado que cuando se ajustan ángulos de convergencia distintos en cada rueda del eje de dirección, el vehículo tiende a circular en línea recta, aunque con el volante desplazado de su posición centrada. Este efecto de “centrado automático” de la dirección se puede explicar por el hecho de que las manguetas de ambas ruedas se encuentran unidas mediante las barras de acoplamiento de la dirección, por lo que los ángulos de convergencia se reparten por igual, para alcanzar un equilibrio de fuerzas laterales. Otro factor que contribuye a este “centrado automático” es que la gran mayoría de los turismos presentan un ángulo de avance con valor positivo, que, como se vio en el apartado 2.2.1.3, favorece la estabilidad direccional del vehículo. Sin embargo, en el eje trasero no ocurre lo mismo; al no estar relacionados los ángulos de las dos ruedas, si se ajusta una distinta convergencia en cada una de las ruedas, el eje hace un

efecto “timón”, lo cual obliga a girar el volante y mantener una fuerza sobre él, para mantener una trayectoria recta.

Como resultado, se puede afirmar que, en condiciones de circulación a baja velocidad, es indiferente el ángulo exacto de convergencia de cada una de las ruedas de un eje, ya que el volante va a tender a situarse en una posición que reparta el ángulo de convergencia total de un eje a partes iguales entre las dos ruedas.

Se ha comprobado también, mediante el estudio en detalle de los desplazamientos de la RD respecto a la placa y de esta al suelo fijo (Figura 4.17), que el desplazamiento respecto a la placa ($d1$ en la figura) se debe exclusivamente al ángulo de convergencia de la rueda que pasa sobre la misma. Sin embargo, el desplazamiento de la placa respecto al suelo ($d2$) se debe al ángulo de convergencia total.

Estas constataciones van a ser de utilidad a la hora de plantear el modelo propuesto en el apartado 5.4.8.

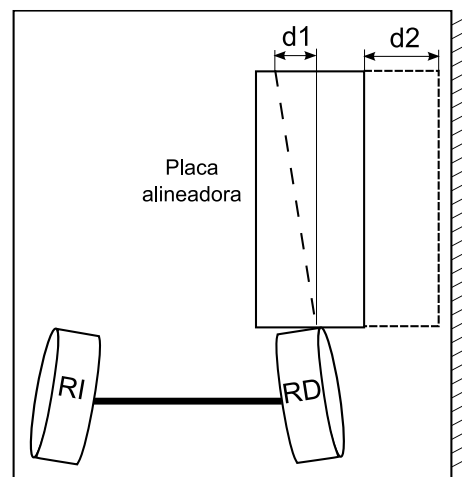


Figura 4.17 Desplazamiento entre rueda y placa, y placa y suelo fijo

Por último, un factor importante a tener en cuenta de cara al análisis de los resultados es la posible anulación de efectos opuestos en la medida. Por este término se pretende designar tanto la compensación de un efecto producido en una rueda del eje con el producido en la rueda opuesta, como del producido dentro de una misma rueda por un ángulo de caída de un signo con el de convergencia de signo contrario, o guiado de capas, conicidad, etc. La razón por la que se puede producir esta situación es, por una parte, y como se acaba de ver, porque este tipo de instrumentos miden la desalineación total del eje, no sólo de la rueda que pasa

sobre la placa de medición. Por otra parte, este efecto es difícilmente evitable en cuanto que una caída negativa en una rueda pueda contrarrestar, dependiendo de sus respectivas magnitudes, una convergencia negativa en la misma rueda. A este respecto, el ángulo de caída y la conicidad producen desplazamientos con el mismo signo independiente del sentido de circulación del vehículo, mientras que convergencia y guiado de capas actúan con el signo invertido al cambiar el sentido de la marcha. En estos casos, la única solución para distinguir entre conicidad y caída, y entre convergencia y guiado de capas sería desmontar las ruedas y realizarles aparte una medida de fuerza lateral, ya que caída y convergencia son ajustes del vehículo, mientras que conicidad y guiado de capas son inherentes al neumático. Una manera para comprobar si una determinada medida de desviación lateral se debe principalmente al ángulo de caída o al de convergencia consiste en observar qué cara del neumático está más desgastada, en función de si el desplazamiento indicado por el alineador ha sido negativo o positivo; un ángulo de convergencia o de caída positivo causa un desgaste anormal en la cara externa de los neumáticos, si bien provocan desplazamientos de signo contrario. Convergencias o caídas negativas causan desgaste excesivo en la cara interna del neumático.

A continuación se indica con mayor detalle la posible anulación del efecto de la convergencia de una rueda con la opuesta del mismo eje. El resultado dependerá de si se mantiene el volante fijo en su posición central, o se le deja que adquiera su posición de equilibrio. En el caso de que se mantenga el volante fijo, mientras que ambas ruedas del eje presentan ángulos de convergencia de la misma magnitud y signo contrario (ángulo de convergencia total cero), se produce un resultado de desplazamiento lateral nulo de la placa, aunque el vehículo sí se desplaza lateralmente. Esto es así porque el desplazamiento d_1 , antes mencionado, se ve anulado con el desplazamiento d_2 . En la Figura 4.18 se puede comprobar que el único desplazamiento de placa en esta situación es el que se registra en la placa de compensación, y es el debido a la relajación de la deformación previa, que en este caso sería pequeña, al ser cero el ángulo de convergencia total. Sin embargo, cuando se deja libre el volante, este tiende a girar hasta encontrar el equilibrio de fuerzas laterales, que en este caso se da con ángulo de deriva cero en ambas ruedas. En cualquiera de estos casos, dado que el ángulo de convergencia total del eje es cero, la desviación lateral indicada por el alineador es cero (en ausencia de otros efectos), al igual que la fuerza detectada por una placa dinamométrica. No obstante, y a pesar de que el vehículo circule recto, sin desgaste anormal de

neumáticos, esta situación no es deseable ya que el ángulo máximo de dirección a derecha e izquierda alcanza distinto valor, lo cual implica un distinto radio de giro a derecha e izquierda y la consiguiente diferencia en maniobrabilidad. Si el ángulo de convergencia total del eje no fuera cero, no cabría hablar de anulación de efectos contrarios de convergencia, sino que se transformaría en uno de los tres casos analizados anteriormente.

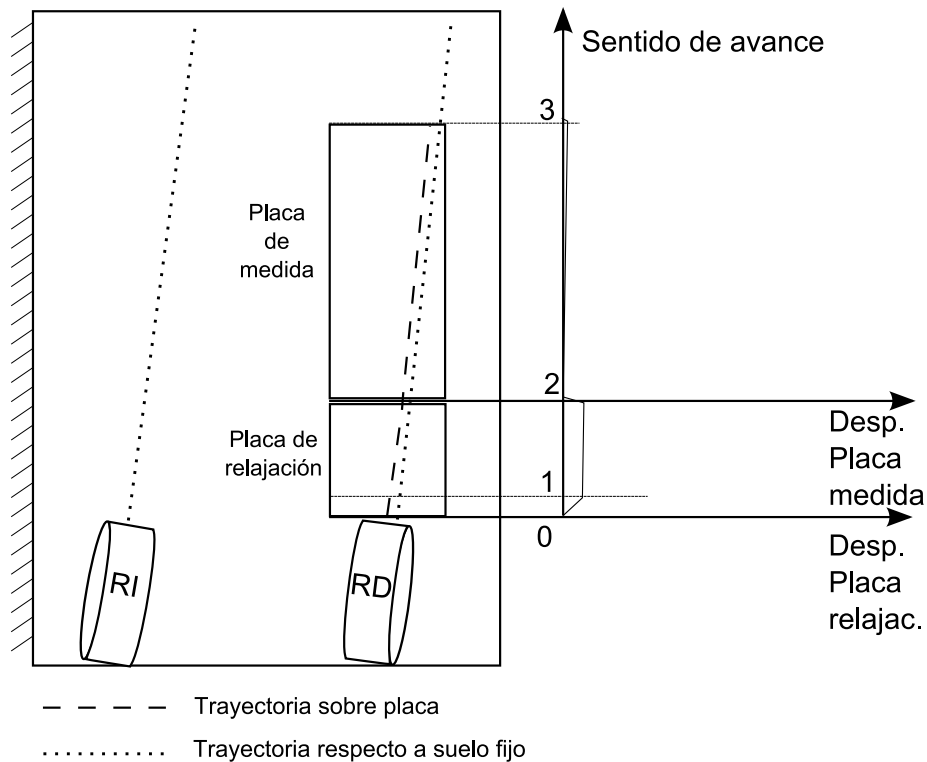


Figura 4.18 Anulación del efecto de convergencias de distinto signo (con volante fijo)

Capítulo 5 Factores que influyen en la desviación lateral

En este capítulo, se presenta el estudio llevado a cabo para determinar la influencia de los distintos factores sobre la medida de desviación lateral efectuada mediante placa alineadora. No se ha encontrado que se haya realizado hasta ahora un estudio similar en la bibliografía. El conocimiento de esta influencia, junto con el resto de trabajos realizados para esta tesis, permitirá alcanzar el objetivo planteado, consistente en desarrollar los criterios de inspección del sistema de dirección presentados en el Capítulo 7.

Para la consecución de este estudio se ha llevado a cabo un programa de ensayos experimentales en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III, por lo que se comenzará por presentar la instrumentación empleada, el diseño de experimentos y la metodología seguida. Como se verá, los ensayos se han realizado en dos fases diferenciadas: una sistemática, durante la que se ha utilizado un único vehículo con distintos ajustes, y otra en la que se ha profundizado en el efecto concreto del ángulo de convergencia.

5.1 Instrumentación empleada

El principal equipo que se ha empleado para esta tesis es la placa alineadora presentada en el apartado 4.1. Esta placa se usa normalmente de forma autónoma, en combinación con una unidad de procesamiento y una pantalla de visualización de los resultados. Sin embargo, para este estudio se realiza una derivación de la señal proveniente de su sensor de desplazamiento, con el objetivo de registrar de forma continua la salida de voltaje, al margen de la visualización del resultado del cálculo de desviación lateral en m/km en su propia pantalla. Un valor positivo de la señal de voltaje implica un desplazamiento positivo de la placa, correspondiente a convergencia total de eje positiva (es decir, desplazamiento de la placa alejándose del plano medio del vehículo). La captura de esta señal se efectúa por medio de un sistema de adquisición de datos consistente en:

- Tres tarjetas de adquisición modelo 5110 de marca Measurements Group, con 5 canales por tarjeta.
- Sistema Scanner 5000 para acondicionamiento de la señal y software Win 5000, de marca Measurements Group.
- Ordenador personal.

El equipo empleado para la medición exacta de los ángulos de alineación de los vehículos ensayados es un medidor de ángulos convencional marca Focus, modelo DWA 600 (Figura 2.17). Este equipo utiliza una tecnología de captación de haces de infrarrojo mediante cámaras CCD, que le permite obtener una precisión en la medida de centésimas de grado.

Complementariamente a la medida de desplazamiento lateral efectuada por la placa alineadora, se registra también, para cada ensayo, la medida de la fuerza lateral desarrollada en el contacto entre el neumático y el suelo fijo, mediante una placa dinamométrica marca AMTI, *Biomechanics Force Platform*, serie BP6001200, modelo 4000 (Figura 5.1), conectada al mismo equipo de adquisición mencionado. Si bien dicha placa está orientada a estudios biomecánicos, la elevada rigidez y reducida masa del elemento que entra en contacto con la rueda, y la alta respuesta en frecuencia de sus sensores, hacen que este equipo sea también apto para su uso en el laboratorio de automóviles. Sus dimensiones son: 1200 mm de longitud y 600 mm de anchura, y la robustez está garantizada para el uso que se le va a dar en laboratorio, ya que cuenta con un límite de fuerza vertical admisible de

4000 lb (17800 N). Esta placa es capaz de registrar fuerzas y momentos en los tres ejes mediante galgas extensométricas, siendo su límite de medida de fuerza lateral y longitudinal de 8900 N. El revestimiento de su superficie de rodadura permite una elevada capacidad de transmisión de esfuerzos tangenciales, como los causados por la fuerza lateral del neumático.



Figura 5.1 Placa dinamométrica utilizada

Otros elementos de instrumentación empleados han sido células de carga, tanto para determinar la constante de los muelles de centrado de la placa de forma aislada, como la fuerza total ejercida por la placa alineadora a lo largo de su recorrido.

A continuación se presenta el proceso llevado a cabo para la calibración de los equipos empleados en este estudio.

5.1.1 Calibración

Por un lado, el sistema de adquisición de datos se ha calibrado previamente según la guía EA-4/02 (European co-operation for Accreditation, 1999).

Por otro, se ha efectuado la calibración de la placa alineadora, haciendo uso de un útil de calibración especialmente diseñado al efecto. Mediante dicho útil (mostrado en la Figura 5.2) se puede conocer con gran precisión el desplazamiento lateral de la placa. Este útil consta de un tornillo de paso muy fino que modifica la posición de la placa y un reloj comparador, que registra el desplazamiento experimentado. Por lo tanto, para calibrar la placa se anota simultáneamente el valor del reloj comparador y la medida del sensor de desplazamiento.



Figura 5.2 Útil de calibración de placa alineadora

En la Tabla 5–1 se presentan, en la primera columna, las medias de las medidas de tensión del sensor para los distintos desplazamientos reales de la placa (los cuales se encuentran, a su vez, en la columna 2). En la tercera columna se encuentra el desplazamiento para cada voltaje que se obtendría al realizar un ajuste lineal de los puntos de calibración, y en la cuarta su diferencia con el valor real. En la quinta columna se muestran los desplazamientos calculados para cada nivel de tensión, a partir de un ajuste polinómico de cuarto grado (que se presentará posteriormente), así como su diferencia con el valor medido, en la última columna.

Como se puede comprobar en la Tabla 5–1, mediante el ajuste lineal se obtienen diferencias entre el desplazamiento real y el estimado de más de 1 mm, razón por la cual se ha decidido optar por un ajuste polinómico de cuarto grado, que reduce considerablemente dichas diferencias. Se ha hecho uso del coeficiente de determinación R^2 de Pearson para la determinación de la bondad del ajuste mediante una u otra función. Cuanto más elevado es este coeficiente (que tiene como valor máximo 1), significa que mayor es la proporción de la varianza de la variable dependiente (en este caso el desplazamiento lateral de la placa) que se puede atribuir a la varianza de la independiente (el voltaje en el sensor). Así, el coeficiente para el ajuste lineal es de 0,9860, mientras que para el ajuste polinómico este coeficiente se sitúa en 0,9998. A la vista de ambos, se ha considerado importante la precisión adicional otorgada por el ajuste polinómico,

razón por la cual ha sido este el retenido para obtener las medidas de desplazamiento lateral.

Tabla 5-1 Comparativa de ajuste de las curvas de calibración

Sensor (V)	Medic. real (m)	Ajuste lineal (m)	Error (m)	Ajuste 4° (m)	Error (m)
2,26	0,009	0,0100	0,0010	0,0086	-0,0004
1,95	0,008	0,0086	0,0006	0,0080	0,0000
1,69	0,007	0,0073	0,0003	0,0071	0,0001
1,41	0,006	0,0060	0,0000	0,0060	0,0000
1,17	0,005	0,0049	-0,0001	0,0050	0,0000
0,92	0,004	0,0037	-0,0003	0,0040	0,0000
0,69	0,003	0,0026	-0,0004	0,0030	0,0000
0,44	0,002	0,0015	-0,0005	0,0019	-0,0001
0,22	0,001	0,0004	-0,0006	0,0010	0,0000
0	0	-0,0006	-0,0006	0,0001	0,0001
-0,23	-0,001	-0,0017	-0,0007	-0,0009	0,0001
-0,46	-0,002	-0,0028	-0,0008	-0,0020	0,0000
-0,66	-0,003	-0,0037	-0,0007	-0,0030	0,0000
-0,85	-0,004	-0,0046	-0,0006	-0,0041	-0,0001
-1,01	-0,005	-0,0053	-0,0003	-0,0052	-0,0002
-1,15	-0,006	-0,0060	0,0000	-0,0062	-0,0002
-1,27	-0,007	-0,0066	0,0004	-0,0073	-0,0003
-1,38	-0,008	-0,0071	0,0009	-0,0083	-0,0003
-1,46	-0,009	-0,0075	0,0015	-0,0091	-0,0001

La ecuación resultante de la calibración, que relaciona el voltaje de salida del sensor con el desplazamiento de la placa mediante un polinomio de cuarto grado es la siguiente:

$$d_l = -0,0002 \cdot V^4 + 0,0005 \cdot V^3 - 0,0003 \cdot V^2 + 0,0042 \cdot V + 0,0001 \quad (5-1)$$

donde d_l es el desplazamiento lateral de la placa en metros, y V es la tensión recibida del sensor, en voltios.

En la Figura 5.3 se puede comprobar la diferencia en el grado de ajuste entre el lineal y el polinómico de cuarto grado. Este último presenta los efectos típicos de decaimiento en los extremos de su rango nominal de medida de los sensores de tipo inductivo, como el utilizado en este caso, cuya curva característica de medida fue presentada en la Figura 4.5.

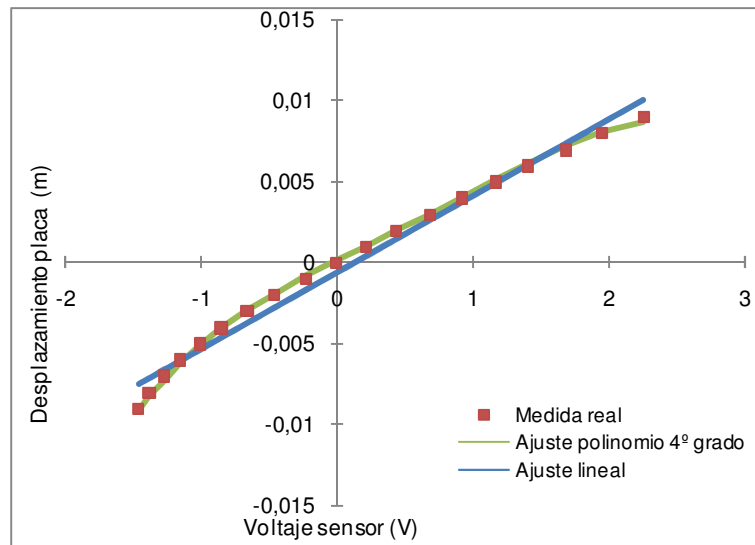


Figura 5.3 Comparativa de ajustes de calibración

5.1.2 Vehículos ensayados

Los ensayos experimentales cuyos resultados se presentan en este capítulo de la tesis se han llevado a cabo en dos fases diferenciadas. La primera de ellas ha consistido en un estudio sistemático de la influencia de las variables identificadas en el apartado 5.2, ensayando para ello todas las combinaciones que se proponen en dicho apartado. Para esta fase se ha empleado un único vehículo, ya que a los efectos de este estudio, la diferencia entre unos u otros vehículos se traduce por una determinada geometría de convergencia y la masa sobre las ruedas, por lo que al modificar estas variables se obtiene aproximadamente el mismo resultado que si se cambiara de vehículo. En la Tabla 5–2 se presentan los ángulos de alineación establecidos por el fabricante del vehículo que se ha usado de referencia para todas las combinaciones de variables ensayadas. Se trata de un Mazda 2 1.2 Active, representativo de la categoría de turismos mayoritaria en el parque automovilístico de nuestro país (segmento B). Como en la mayoría de los turismos, el único ángulo ajustable es el de convergencia del eje delantero.

En una segunda fase se ha profundizado exclusivamente en la relación entre ángulo de convergencia total del eje y desviación lateral, ya que, como se mostrará en el apartado 5.4, las demás variables no ejercen prácticamente influencia. Para ello, se han empleado tres vehículos de los que se disponía en el Laboratorio para fines de investigación, a los que se ha variado el ángulo de convergencia para comprobar el efecto únicamente de este factor, manteniendo constantes todos los demás. Además, se ensayaron otros ochenta turismos, sin alterar el ángulo de convergencia con que cada uno estuviese ajustado, con el objetivo de desarrollar y

validar, tanto el modelo de desviación lateral propuesto en el apartado 5.4.8, como los criterios de inspección propuestos en el Capítulo 7.

Tabla 5-2 Ángulos de alineación recomendados para el vehículo ensayado.

		Ángulos			
Eje	Ángulo	Mínimo (°)	Preferido (°)	Máximo (°)	Tolerancia (°)
Delantero					
	Avance	1,17	2,17	3,17	+/- 1
	Caída	-0,83	0,17	1,17	+/- 1
	Salida		14,25		
	Convergencia total	-0,1	0,3	0,7	+/- 0,4
Trasero					
	Caída	-2,5	-1,5	-0,5	+/- 1
	Convergencia total	-0,2	0,2	0,6	+/- 0,4

En cuanto a los neumáticos utilizados en la fase de ensayos sistemáticos, se han montado dos juegos distintos, tanto en desgaste como en dibujo, para comprobar su influencia en la medida de desplazamiento, siendo ambos del tamaño homologado para el vehículo (175/65 R14):

- Neumáticos I (nuevos): BRIDGESTONE B391 175/65 R14. Se trata de neumáticos en muy buen estado, sin desgaste.
- Neumáticos II (gastados): HANKOOK RA14 175/65 R14. Este juego presenta un considerable desgaste, debido a su uso durante aproximadamente 50.000 km.

Al margen de los ensayos sistemáticos, también se estudió la posible influencia del uso de un tamaño de neumático muy distinto al recomendado, el 185/65 R15, como se indicará en el apartado 5.4.6.

5.2 Diseño de experimentos

A partir de la bibliografía consultada y el estudio preliminar llevado a cabo con anterioridad a la fase de ensayos experimentales, se han identificado aquellos

factores que, a priori, pueden tener una mayor influencia en el resultado de las medidas de desplazamiento lateral mediante placa alineadora:

- Ángulo de convergencia total del eje
- Masa total del vehículo
- Características del neumático
- Presión de inflado del neumático
- Ángulo de caída
- Superficie de rodadura de la placa de medida
- Velocidad de paso por la placa
- Temperatura del neumático

Por su paralelismo con este estudio, ha tenido especial relevancia en el diseño de experimentos la tesis doctoral realizada por García-Pozuelo (García-Pozuelo, 2008), según la cual los parámetros que más influyen en la medida de fuerzas de contacto sobre una superficie sin desplazamiento lateral son el ángulo de convergencia, la presión de inflado, las características particulares de cada neumático y la fuerza vertical sobre el mismo.

A continuación, se exponen brevemente las razones para la inclusión o no en la lista de variables de los ensayos sistemáticos de cada uno de los parámetros identificados, así como el rango de valores de los mismos que se ha decidido estudiar:

- Ángulo de convergencia total por eje (α). En base a la bibliografía consultada (Gillespie, 1992; Dixon, 1996; Milliken, Milliken & Olley, 2002; Pacejka, 2002), el ángulo de convergencia constituye el principal parámetro que afecta al comportamiento lateral del neumático, y por lo tanto también va a ser la variable que se estudie más en profundidad en este capítulo, efectuando, al margen de los ensayos sistemáticos derivados del presente diseño de experimentos, una serie específica de medidas. Como se indica en el apartado 4.1, los límites de medida de la placa alineadora utilizada son de ± 20 m/km. Este valor de desviación correspondería aproximadamente a un ángulo de convergencia de $\pm 1,5^\circ$. Por lo tanto, se decide no superar el valor de $\pm 1^\circ$, con objeto de asegurar que en ningún caso se van a alcanzar dichos límites.

El ajuste de un determinado ángulo de convergencia con precisión resulta complicado, debido a que una mínima variación de longitud en la barra de acoplamiento de la dirección provoca una modificación considerable del ángulo de convergencia, y también a los elementos elásticos que componen el sistema de dirección-suspensión, lo que en conjunto hace que esta medida sea muy sensible. Por este motivo se decide establecer un intervalo de $0,5^\circ$ para el ajuste de la convergencia total por eje. De esta forma se pretende asegurar que una medida no se va a solapar con la siguiente o la anterior, debido a la variabilidad propia del ángulo de convergencia al circular. Se debe tener en cuenta que el intervalo de $0,5^\circ$ de convergencia total por eje corresponde a $0,25^\circ$ en cada rueda, que es en realidad la magnitud que se ajusta físicamente en los vehículos.

Cada ángulo de convergencia va a ser ensayado con cada uno de los valores de todas las demás variables estudiadas. Por último, cabe señalar que se ha incluido también el valor de $0,3^\circ$ de convergencia total, dado que este es el valor recomendado por el fabricante para el vehículo ensayado. Las conclusiones obtenidas del estudio de la influencia de la convergencia en la desviación lateral se recogen en el apartado 5.4.8.

- Masa total del vehículo (m). Además de su posible influencia sobre la desviación lateral, se ha comprobado (como se verá en el apartado 5.4.7) que este factor modifica el ángulo de convergencia al variar la altura del chasis, por lo que también se ha decidido que sea una de las variables a estudiar en los ensayos. Se analiza su influencia manteniendo constante la variable presión de inflado en su valor recomendado por el fabricante. Se han realizado medidas para tres valores: únicamente con conductor (m_1 , masa total de 1.135 kg), con una masa adicional de 125 kg (m_2 , masa total de 1.260 kg), y con una masa adicional de 200 kg (m_3 , masa total 1.335 kg).
- Características del neumático (N). Se pueden considerar tanto las propias del modelo (dibujo, compuestos, etc.), como las particulares de desgaste y defectos (guiado de capas, conicidad). Se ha estudiado la influencia de ambos grupos de características en el apartado 5.4.6, haciendo uso de dos juegos de neumáticos de la medida homologada para el vehículo ensayado, de distinto modelo y estado de desgaste: NI y NII; estos dos juegos se han ensayado en todas las combinaciones de variables. Adicionalmente, se ha

estudiado la influencia del tamaño del neumático mediante la utilización de otro juego de distinto tamaño y modelo, al margen de las demás variables.

- Presión de inflado del neumático (P). Se ha decidido evaluar la influencia de esta variable mediante el inflado del neumático al valor recomendado ($P_2=2$ bar), y un valor suficientemente diferenciado del mismo superior ($P_3=2,5$ bar) e inferiormente ($P_1=1,5$ bar). Cabe señalar que la influencia de la presión se ha estudiado, en el apartado 5.4.5, manteniendo constante la variable masa total del vehículo.
- Ángulo de caída. A priori esta variable podría afectar a la medida de desplazamiento lateral, aunque su influencia, como será discutido en el apartado 5.4.4, es mucho menor que la del ángulo de convergencia. Además, este ángulo no es modificable en la mayoría de vehículos, por lo que no ha sido posible estudiar experimentalmente su efecto.
- Características de la superficie de la placa, en cuanto a coeficiente de rozamiento, suciedad, etc. No se ha incluido como variable de estos ensayos, tras realizar unas pruebas preliminares cuyos resultados se presentan en el apartado 5.4.3, y que indican la ausencia de efectos sobre la desviación lateral en placa alineadora.
- Velocidad de paso del vehículo. El rango de variación de la velocidad de paso sobre la placa alineadora que se puede dar a la hora del ensayo en la ITV es bastante limitado. Este normalmente se realiza a la velocidad del paso humano, ya que el inspector acompaña el paso del vehículo caminando. Por este motivo, este factor no se ha tomado como una de las variables a analizar sistemáticamente en los ensayos. Su posible efecto, sin embargo, se estudia en el apartado 5.4.2.
- Temperatura del neumático. A través de los ensayos preliminares se ha comprobado que su efecto, dentro del rango de variación normal de la misma, no es relevante, ni siquiera para la producción de fuerza sobre una superficie fija. No se ha incluido, por tanto, en el diseño de experimentos del estudio sistemático, pero en el apartado 5.4.1 se exponen los resultados experimentales obtenidos de los ensayos llevados a cabo.

En definitiva, en la Tabla 5-3 se muestran los rangos de variación que se han determinado adecuados para realizar un estudio sistemático de la influencia de

cada una de las variables estudiadas, manteniendo constante el vehículo, y combinando todas las demás variables.

Tabla 5-3 Rangos de variación de las variables para los ensayos sistemáticos

Variable	Ud.	Mínimo	Máximo	Intervalo	Total de valores
α : Convergencia	°	-1	1	0,5*	6
P: Presión	bar	1,5	2,5	0,5	3
m: Masa	kg	1135	1335	-	3
N: Neumático**	-	-	-	-	2

* Se ha incluido también el ángulo de 0,3°

** Se han usado dos juegos de neumáticos

El resultado en cuanto a número de ensayos sistemáticos programados arroja un total de 60 combinaciones a analizar, cuyos resultados permitirán estudiar individualmente cada una de las variables, al permanecer constantes las demás. Aparte de estos ensayos sistemáticos, se va a hacer uso también de los resultados de los ensayos realizados en fases preliminares de la tesis, así como de ensayos específicos para analizar más en detalle la relación entre convergencia y desviación lateral, y la influencia del tamaño del neumático. En total, el número de ensayos cuyos resultados han sido utilizados para las conclusiones presentadas en el presente capítulo es de unos doscientos.

El esquema general de las combinaciones a realizar en la fase sistemática con las distintas variables se representa en la Figura 5.4. Como se puede observar en la misma, para cada neumático se ajustarán los distintos ángulos de convergencia α . Para cada ángulo de convergencia se realizarán ensayos a tres presiones distintas, y para la presión recomendada por el fabricante (P_2) se efectuarán las medidas con tres masas distintas.

$$N_{i*} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \alpha_{j*} \\ \cdot \\ \cdot \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} P_1 \rightarrow m_1 \\ P_2 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{array} \right\} \\ P_3 \rightarrow m_1 \end{array} \right.$$

* Donde i toma valores I y II, y j de 1 a 6

Figura 5.4 Esquema de combinaciones de variables de la fase sistemática

5.3 Metodología de los ensayos experimentales

En este apartado, se indica la metodología seguida para los ensayos de la fase sistemática, si bien alguno de estos puntos son aplicables para el conjunto de ensayos realizados.

En primer lugar, se debe partir de la calibración de los equipos empleados, que ya ha sido presentada en el apartado 5.1.1.

Con anterioridad al primer ensayo experimental de cada vehículo se comprueba que el mismo no presente juego excesivo en los rodamientos de las ruedas ni en las articulaciones de la dirección y suspensión, lo cual podría causar un incremento de la variabilidad de las medidas.

Cabe destacar que desde los ensayos preliminares se ha observado que el ángulo de convergencia efectivo se ve alterado en función de la masa total del vehículo. Se ha estudiado este fenómeno, conocido en la bibliografía como “*bump steer*” (modificación de la dirección con el recorrido de la suspensión) (Reimpell, Stoll & Betzler, 2000b; Haney, 2003), llegando a las conclusiones que se detallan en el apartado 5.4.7. Este fenómeno ha sido tenido en cuenta a la hora de establecer la metodología a seguir en los ensayos sistemáticos: el ángulo de convergencia se ajusta siempre con el vehículo en orden de marcha, obteniendo por lo tanto un ángulo de convergencia “inicial”. Al añadir masa al vehículo, esto afecta al recorrido de la suspensión, que como resultado modifica a su vez el ángulo de convergencia “efectivo” (y en consecuencia afecta también al desplazamiento y a la fuerza lateral medidos en el contacto con el suelo). Una vez realizadas las medidas necesarias para cuantificar este efecto, se ha implementado un factor de corrección del ángulo de convergencia en función de la masa adicional embarcada en el vehículo, que será presentado en el apartado 5.4.7.

Tras completar las cuestiones previas, el proceso seguido para cada una de las medidas es siempre el mismo, y se describe a continuación:

1. En cada sesión de ensayos se comienza por autocalibrar los equipos, y ajustar el cero de medida.
2. Se monta un determinado juego de neumáticos.
3. Se ajusta el ángulo de convergencia total del eje, mediante la modificación de la longitud de cada una de las barras de

acoplamiento de la dirección (Halderman, 2000; Autodata, 2005). En la Figura 5.5 se muestra en primer plano la barra correspondiente a uno de los vehículos ensayados. En dicha figura se pueden observar también los numerosos elementos elásticos que permiten configurar la geometría de la dirección, y que son una fuente importante de variabilidad en los ensayos.



Figura 5.5 Barra de acoplamiento de la dirección

4. Se realizan los ensayos con las tres masas diferentes (1135 kg, 1260 kg y 1335 kg), a la presión recomendada por el fabricante (2 bar).
5. Se llevan a cabo los ensayos a una presión superior (2,5 bar) e inferior (1,5 bar), con la masa adicional únicamente del conductor.

Se ha escogido esta secuenciación por el orden decreciente de laboriosidad para modificar las variables. En la Figura 5.6 se resume la metodología descrita.

Durante los ensayos se registra, por distintos canales, tanto el desplazamiento de la placa alineadora, como las fuerzas y momentos que es capaz de medir la placa dinamométrica. Cabe mencionar que, de las seis magnitudes disponibles en la placa dinamométrica (fuerzas y momentos en los tres ejes), únicamente se hace uso de la fuerza lateral, para el análisis llevado a cabo en el Capítulo 6, si bien las demás magnitudes proporcionan información adicional sobre el recorrido de la rueda sobre la placa. Cada uno de estos registros se identifica con los valores de las variables con que se ha realizado el ensayo, para su posterior análisis.

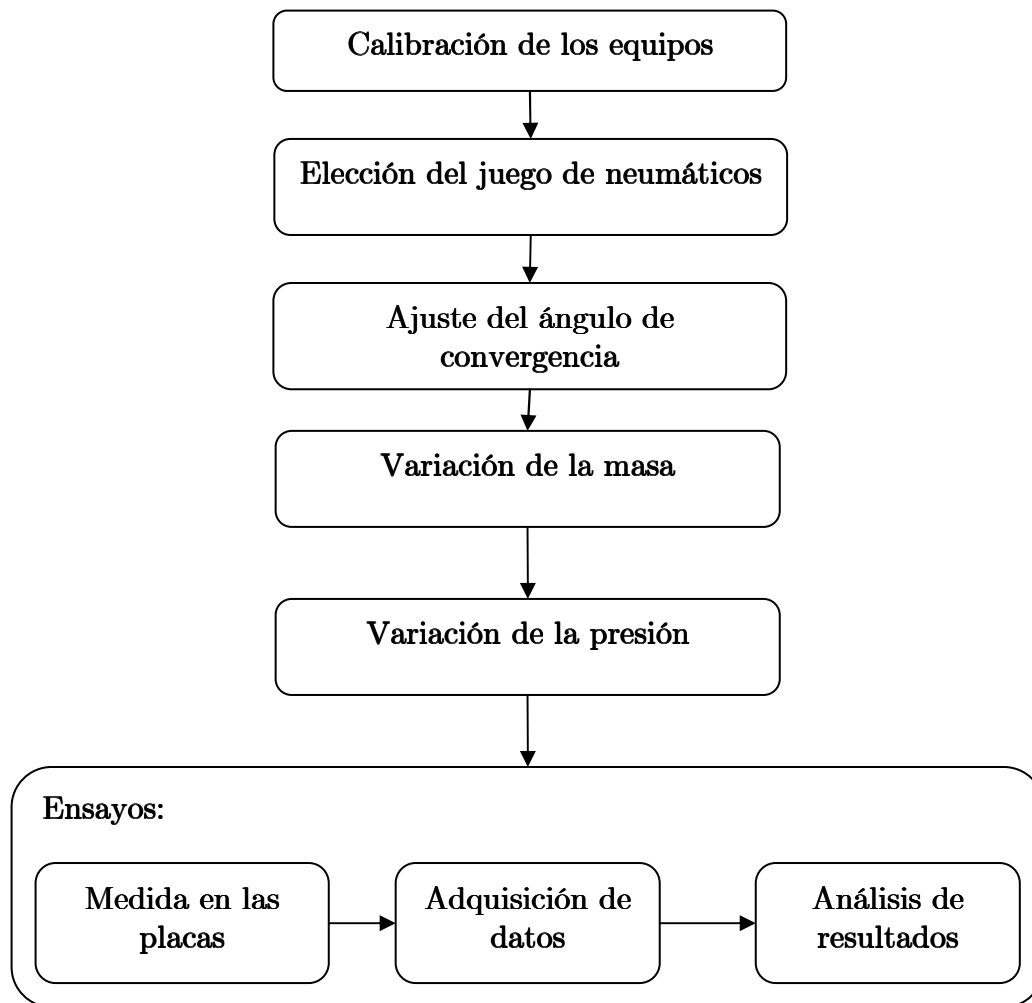


Figura 5.6 Esquema de la metodología seguida para los ensayos

Se ha estimado adecuado realizar 10 repeticiones de cada ensayo, de las que después se obtiene el valor medio, de cara a asegurar la calidad de los resultados.

Cada una de las repeticiones consiste en conducir el vehículo sobre la placa alineadora, lentamente y con el volante libre, partiendo desde la base de la plataforma elevada de línea ITV donde se encuentran instaladas las placas de medida. Al superar la rampa de subida a la plataforma (que se puede observar en la Figura 5.7) se modifica considerablemente el recorrido de la suspensión, comprimiéndose y asentándose de nuevo, aumentando así la representatividad de los ensayos, al permitir que se parta de distintas longitudes iniciales para realizar el ensayo, como le sucedería a un vehículo que se presentase a la ITV después de haber circulado en condiciones reales.



Figura 5.7 Línea ITV utilizada para los ensayos

5.4 Influencia de los distintos parámetros en la desviación lateral

En los siguientes apartados, se presentan los resultados del estudio experimental sobre los distintos factores que influyen en la desviación lateral medida por la placa alineadora. Dentro del apartado 5.4.8 se presenta también el modelo desarrollado sobre la relación existente entre el ángulo de convergencia total del eje y la desviación lateral.

5.4.1 Influencia de la temperatura

Es sabido que la temperatura de los neumáticos resulta determinante en la transmisión de esfuerzos por los mismos al suelo, en situaciones de alta sollicitación, como la competición automovilística, y que este factor se traduce también en una variación de la presión de inflado (Haney, 2003).

El estudio experimental de la influencia de la temperatura en el desplazamiento registrado por la placa alineadora se ha efectuado mediante el uso de calentadores de neumáticos como el mostrado en la Figura 5.8. Los neumáticos se han llevado hasta una temperatura de 75 °C para realizar el ensayo, la cual supera ampliamente la que se puede esperar en una inspección en la ITV.



Figura 5.8 Calentador de neumáticos utilizado en los ensayos

En la Figura 5.9 se muestran los resultados correspondientes al estudio de la influencia de la temperatura en la fuerza lateral, ya que las condiciones de medida con la placa dinamométrica son más exigentes para los neumáticos que las que se producen en la placa alineadora, debido al mayor deslizamiento que se produce entre neumático y suelo.

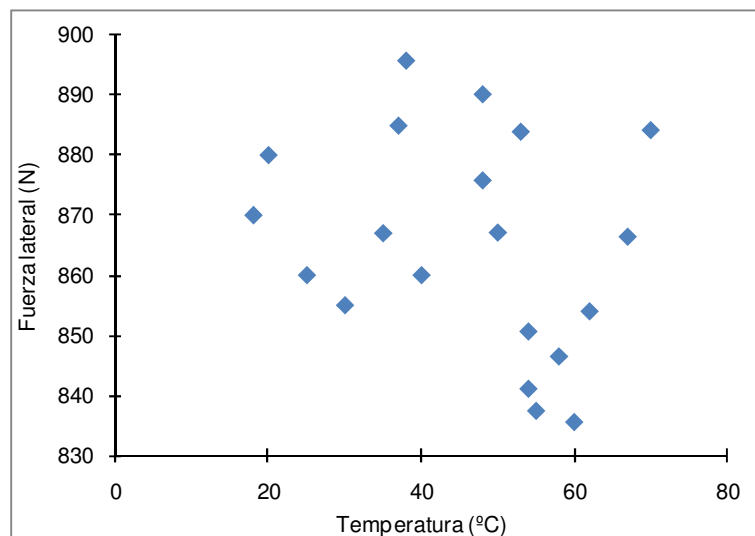


Figura 5.9 Efecto de la temperatura en la fuerza lateral. Neumáticos I, $\alpha=3^\circ$, $P=2$ bar, $m=1135$ kg

Tras el análisis de los resultados de los ensayos, no se ha percibido una variación de la capacidad máxima de transmitir esfuerzos laterales al aumentar la temperatura en la medida con placa dinamométrica. Dado que la placa alineadora presenta unas condiciones de menor exigencia de sollicitaciones laterales (al tener permitido el desplazamiento lateral), no ha sido posible tampoco concluir ninguna influencia de la temperatura en el comportamiento de los neumáticos en los

ensayos en placa alineadora, al menos en el rango de temperaturas que se pueden esperar durante el ensayo en una ITV.

5.4.2 Influencia de la velocidad de paso

Como es lógico, la parte móvil de la placa alineadora debe ser lo suficientemente robusta como para permitir el paso de vehículos por encima de la misma, y aunque se intenta que su construcción no sea excesivamente pesada, su masa puede provocar efectos de inercia si se la somete a un movimiento lateral rápido. Por lo tanto, la velocidad de paso del vehículo sobre la placa debe ser lo bastante reducida, como se ha hecho a lo largo de los ensayos realizados para esta tesis, con el objeto de que el máximo desplazamiento lateral de la placa se produzca cuando el neumático se encuentra todavía en contacto con la misma, y no una vez que ha salido de ella, continuando su movimiento por la inercia adquirida. Tanto en el Manual de Procedimiento ITV (MITYC-ITV, 2009), como en los manuales de los alineadores al paso, se indica claramente que se debe realizar el ensayo a una velocidad reducida (velocidad del paso de una persona, como máximo 7 km/h). En todo caso, en un equipo como el utilizado en los ensayos, con conmutadores de entrada y salida en la placa de medida, se pueden tener en cuenta únicamente los datos obtenidos mientras el neumático está en contacto con la placa (con el debido intervalo de seguridad a la salida del mismo de la placa), independientemente de la velocidad de paso.

Además de los efectos negativos de una velocidad elevada, una variación de velocidad durante la medida puede provocar la modificación del ángulo de convergencia, debido a los efectos de transmisión de potencia mencionados en el apartado 2.2.1.5, por lo que esta es también una circunstancia a evitar.

Al margen de estas dos consideraciones, no se ha encontrado ningún motivo para que la velocidad, siempre que esté dentro de los márgenes razonables a desarrollar en una estación ITV, tenga una influencia determinada en el resultado de la medida. A tal efecto, se realizaron ensayos de comprobación, dentro del rango de velocidades posibles de desarrollar dentro de una línea ITV, sin observar una variación notable de la relación entre desviación lateral y convergencia. En la Tabla 5-4 se muestran los resultados de la medida de desviación lateral en función de la velocidad de paso por la placa, para dos ángulos de convergencia (α) distintos (0,5° y -0,5°). Dentro del rango de velocidades estudiado (de 0,15 a 0,65 m/s), no

se ha encontrado una influencia significativa de la velocidad de paso sobre la medida de desviación obtenida.

Tabla 5-4 Influencia de la velocidad sobre la medida de desviación lateral. Neumático I, P=2 bar, m=1135 kg.

α (°)	V (m/s)	Desv. lat. (m/km)	Dif. con media (%)
0,5	0,17	5,23	+0,4%
0,5	0,22	5,42	+4,0%
0,5	0,31	5,02	-3,6%
0,5	0,45	4,87	-6,5%
0,5	0,63	5,51	+5,8%
Media: 5,21			
-0,5	0,18	-5,71	-0,6%
-0,5	0,23	-5,83	+1,5%
-0,5	0,26	-5,23	-9,0%
-0,5	0,38	-6,02	+4,8%
-0,5	0,63	-5,94	+3,4%
Media: -5,75			

5.4.3 Influencia de la superficie de rodadura

Se realizaron ensayos experimentales sobre la influencia del coeficiente de rozamiento entre neumático y superficie de rodadura en la medida de desplazamiento mediante placa alineadora. Como se ha indicado en el apartado 4.1.3, se necesita una fuerza de pequeña magnitud para vencer la fuerza lateral ejercida por los muelles de centrado y el rozamiento entre la placa y su bastidor fijo. Por lo tanto, valores reducidos de rozamiento permiten obtener la mínima fuerza necesaria para registrar un desplazamiento de la placa alineadora.

En los ensayos se experimentó modificando el coeficiente de rozamiento entre neumático y placa hasta la situación a priori más desfavorable: cuando se interpone una capa de aceite entre ambos elementos (Figura 5.10).

En esta circunstancia se midió la fuerza lateral que es capaz de transmitir el vehículo utilizado en los ensayos, que se representa en la Figura 5.11 en función del tiempo. En los instantes iniciales de la medida, la fuerza registrada es superior a 800 N, mientras que al introducirse la huella del neumático por completo en la zona que contiene la capa de aceite, este valor se ve reducido a un mínimo de 370 N, para ir recuperando de nuevo la fuerza lateral a medida que la huella va

saliendo del aceite. Se recuerda que la fuerza necesaria para alcanzar el desplazamiento lateral máximo de la placa es, como se indica en el apartado 4.1.3, de 100 N. Por lo tanto, el estado de la superficie de rodadura de la placa no resulta un elemento crucial en la medida con placa alineadora. Se ha llegado a la conclusión de que, hasta en el caso más desfavorable, la adherencia resultante es suficiente para mover la placa, incluso para ángulos de convergencia pequeños.



Figura 5.10 Realización del ensayo con una capa de aceite interpuesta

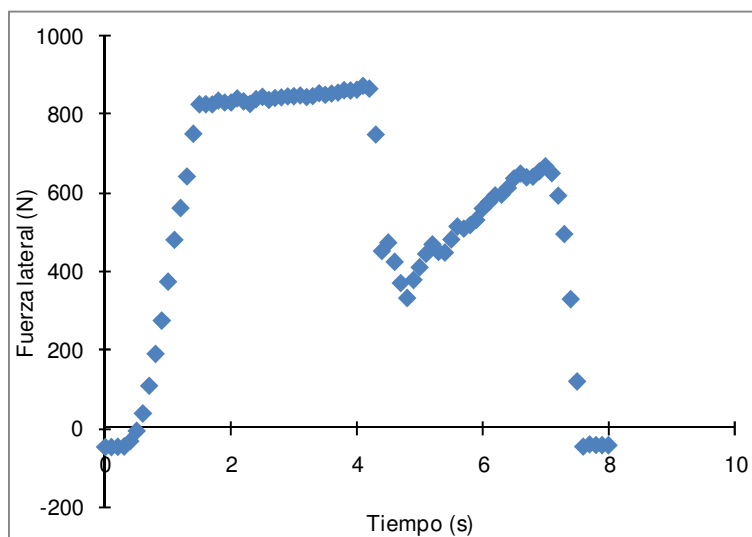


Figura 5.11 Medida de fuerza lateral con una capa de aceite interpuesta

5.4.4 Influencia del ángulo de caída

Desde un punto de vista geométrico, el ángulo de caída no modifica la influencia principal del ángulo de convergencia en la medida con placa alineadora. La orientación longitudinal del plano medio de la rueda es el factor que determina

fundamentalmente el desplazamiento lateral de la placa, y no se ve modificada con el ángulo de caída. La principal influencia del ángulo de caída, por tanto, consiste en modificar la forma del área de contacto, pero su dirección de avance respecto al plano medio del vehículo continúa siendo la misma.

No obstante, como se indicó en el apartado 2.2.1.1, el ángulo de caída sí que tiene un efecto significativo sobre la capacidad del vehículo de desarrollar fuerzas laterales bajo condiciones de alta sollicitación de los neumáticos. En todo caso, incluso en cuanto a su efecto sobre la fuerza lateral, es comúnmente aceptado que este se cuantifica alrededor de un orden de magnitud menor que el ejercido por el ángulo de convergencia, como se muestra en el apartado 6.1.1.

Dado que el vehículo de referencia para los ensayos no presenta la posibilidad de variar el ángulo de caída de las ruedas, no se ha podido comprobar sistemáticamente el efecto que puede tener este factor sobre la relación existente entre convergencia y desviación lateral. No obstante, se ha demostrado (García-Pozuelo, 2008) que, incluso para las condiciones de medida de fuerza lateral mediante placa dinamométrica, y para rangos de variación muy superiores a los que se pueden dar en vehículos de turismo, el efecto del ángulo de caída resulta despreciable frente al del ángulo de convergencia.

En el caso de disponer de un dispositivo para ensayar los neumáticos desmontados del vehículo (no ha sido el caso), se podría cuantificar experimentalmente con precisión el efecto del ángulo de caída sobre la fuerza y desplazamiento laterales, según el método que se ha desarrollado como parte de los trabajos conducentes a esta tesis, y que permite distinguir entre los efectos propios a la estructura interna del neumático, y los debidos a la geometría del sistema de dirección. Para ello, se debería proceder al ensayo de los neumáticos desmontados marcha adelante y marcha atrás, a la velocidad a la que posteriormente serían ensayados sobre el vehículo, y con ángulos de deriva y caída cero. Con este ensayo, se podría determinar la fuerza lateral ejercida en ambos sentidos de giro debido a las características de conicidad y guiado de capas del neumático, mediante las fórmulas contenidas en la bibliografía (Dixon, 1996; Milliken, Milliken & Olley, 2002). A continuación, se procedería al ensayo del vehículo completo mediante la placa dinamométrica y la alineadora, siguiendo el mismo principio (es decir, también marcha adelante y marcha atrás). Mediante las siguientes ecuaciones se propone un método para determinar por separado el efecto del ángulo de caída y de convergencia sobre el comportamiento lateral, una vez descontadas las fuerzas

producidas por el neumático debido a las características de conicidad y guiado de capas:

$$F_{Conv/D} = \frac{F_{y/D} - F_{y/A}}{2} \quad (5-2)$$

$$F_{Caída/D} = \frac{F_{y/D} + F_{y/A}}{2} \quad (5-3)$$

donde $F_{Conv/D}$ es la fuerza lateral debida al ángulo de convergencia con el vehículo circulando marcha adelante, $F_{y/D}$ es la fuerza lateral total registrada por la placa medidora con el vehículo circulando marcha adelante, $F_{y/A}$ es la fuerza lateral total registrada con el vehículo circulando marcha atrás, y $F_{Caída/D}$ es la fuerza lateral debida al ángulo de caída con el vehículo circulando marcha adelante.

Este método se basa en el hecho de que la contribución del ángulo de caída a la fuerza lateral desarrollada entre neumático y suelo mantiene el mismo signo aunque se invierta el sentido de marcha; no así el de convergencia, que invierte su signo al invertir el sentido de giro de las ruedas. De forma análoga se pueden desarrollar expresiones para la medida de desplazamiento, que se muestran a continuación:

$$D_{Conv/D} = \frac{D_{l/D} - D_{l/A}}{2} \quad (5-4)$$

$$D_{Caída/D} = \frac{D_{l/D} + D_{l/A}}{2} \quad (5-5)$$

donde $D_{Conv/D}$ es la desviación lateral debida al ángulo de convergencia con el vehículo circulando marcha adelante, $D_{l/D}$ es la desviación lateral total registrada por la placa medidora con el vehículo circulando marcha adelante. $D_{l/A}$ es la desviación lateral total registrada con el vehículo circulando marcha atrás, y $D_{Caída/D}$ es la desviación lateral debida al ángulo de caída con el vehículo circulando marcha adelante.

Dado que no se ha dispuesto de una máquina de ensayo de neumáticos, no ha podido aplicarse en la práctica el método desarrollado, pero en todo caso su empleo permitiría distinguir entre los efectos del ángulo de convergencia y del de caída.

5.4.5 Influencia de la presión

La presión de inflado de los neumáticos es conocida como uno de los factores determinantes de la capacidad máxima de desarrollar esfuerzos tangenciales en el contacto con el suelo (Pacejka, 2002), lo cual también se comprueba experimentalmente sobre la placa dinamométrica en el apartado 6.1.1 de esta tesis. Mediante los ensayos sistemáticos llevados a cabo para el presente apartado se ha estudiado su posible influencia, en este caso sobre la medida de desviación lateral mediante placa alineadora, cuyas condiciones de sollicitación en el contacto neumático-suelo son bien distintas a las de la dinamométrica, debido al menor deslizamiento lateral. Para ello se han efectuado medidas a la presión recomendada (2 bar), y a otras dos lo suficientemente separadas como para que se tuviera que notar su efecto, en caso de existir (1,5 bar y 2,5 bar).

En las Figuras 5.12 y 5.13 se muestran los resultados experimentales obtenidos de la relación entre ángulo de convergencia y desviación lateral, para los distintos valores de la variable presión de inflado de los neumáticos. Se ha ajustado cada serie de datos mediante las rectas cuyas ecuaciones se incluyen en las figuras. A la vista de las gráficas, no resulta posible aseverar que exista una cierta influencia de esta variable, ya que las medidas obtenidas, y sus rectas de ajuste, se encuentran separadas una magnitud inferior a la propia variabilidad de los ensayos (que se trata en el apartado 5.4.8.).

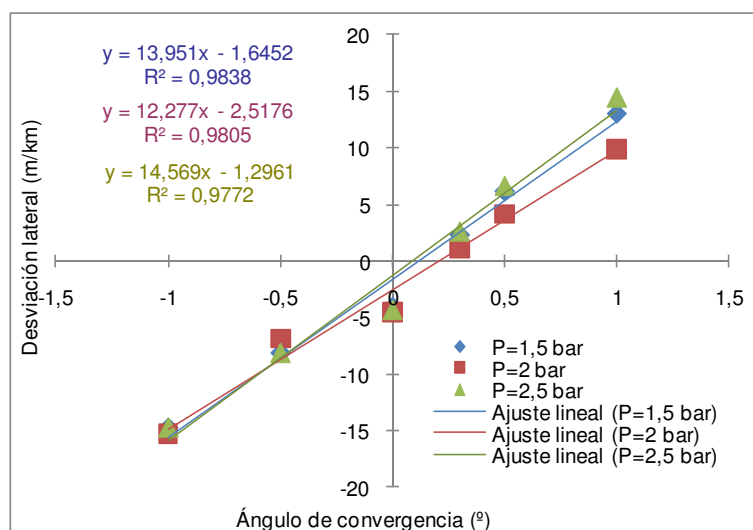


Figura 5.12 Desviación lateral en función de convergencia para distintas presiones. Neumáticos I, $m=1135$ kg

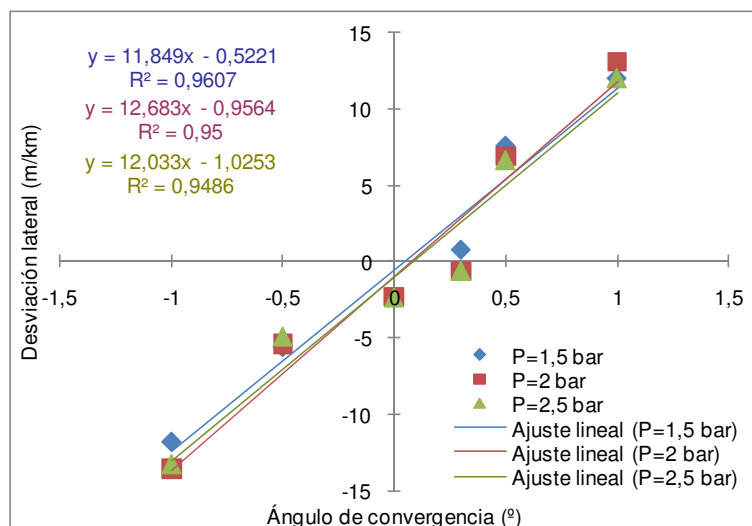


Figura 5.13 Desviación lateral en función de convergencia para distintas presiones. Neumáticos II, $m=1135$ kg

Los resultados anteriores se pueden representar también como desviación lateral frente a presión, para distintos ángulos de convergencia. En la Figura 5.14 (juego de neumáticos I) se aprecia una mayor desviación cuanto mayor es la presión, para ángulos de convergencia positivos. Sin embargo, ese efecto parece ser el contrario para ángulos negativos, por lo que no resulta posible establecer una ley que explique este comportamiento, al margen de la variabilidad de las medidas.

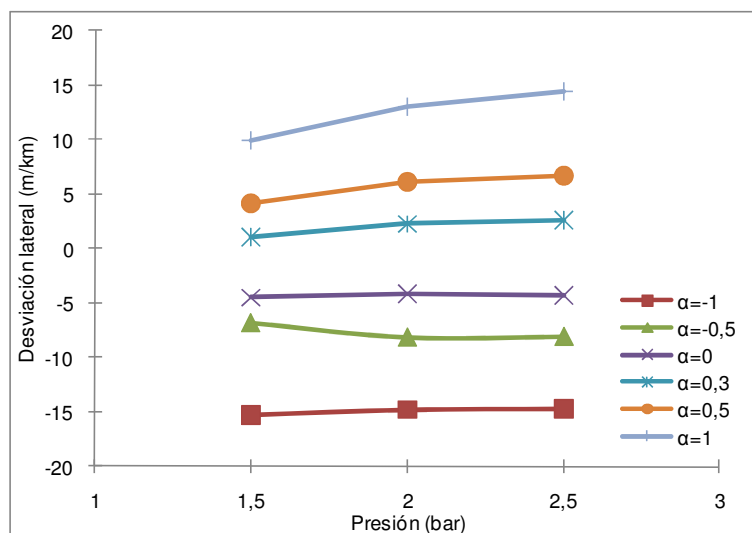


Figura 5.14 Desviación lateral en función de la presión para distintas convergencias. Neumáticos I, $m=1135$ kg

En la Figura 5.15, con el juego de neumáticos II, tanto para ángulos de convergencia positivos como negativos se encuentran efectos contradictorios: en ocasiones se desarrolla mayor desplazamiento para presiones mayores, y en otras, menor.

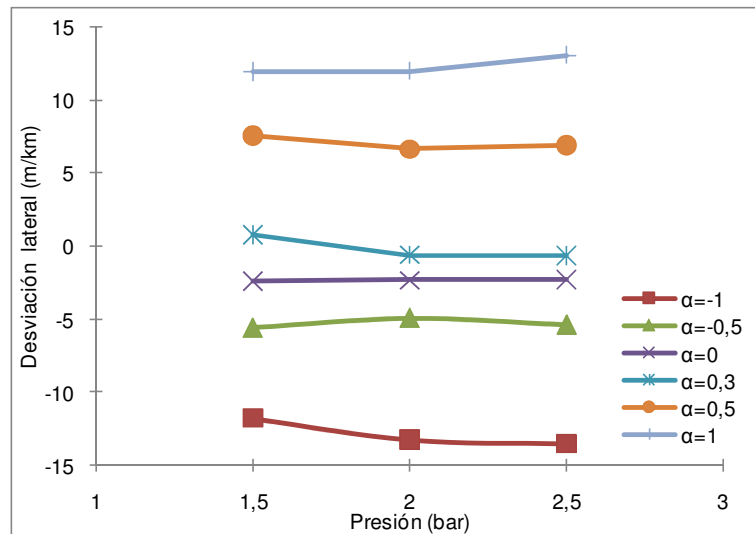


Figura 5.15 Desviación lateral en función de la presión para distintas convergencias. Neumáticos II, $m=1135$ kg

En conclusión, no ha resultado posible determinar una cierta influencia de la presión de inflado sobre la relación existente entre ángulo de convergencia y desviación lateral medida en placa alineadora.

5.4.6 Influencia del neumático

El tamaño de neumático utilizado para los ensayos sistemáticos ha sido el homologado para el modelo de vehículo empleado: 175/65 R14. Además, se han realizado ensayos de comprobación tras montar en el vehículo de referencia otro juego de neumáticos de una medida distinta a la homologada para el mismo: unos Michelin Energy 185/65 R15 88H. La diferencia de radio dinámico entre ambos tamaños es considerable (20 mm), lo que constituye un porcentaje relativo del 7 %.

En la Figura 5.16 se presentan los resultados de los ensayos llevados a cabo para estudiar la influencia del juego de neumáticos empleado sobre la relación entre desviación lateral y convergencia, junto con las rectas que ajustan las distintas series de datos. A la vista de los mismos, si bien existe una cierta diferencia en la pendiente de las rectas que ajustan los datos obtenidos mediante los neumáticos homologados (I y II), la diferencia entre las medidas para cada ángulo de convergencia se mantiene dentro del margen de variabilidad observado, el cual, como se indica en el apartado 5.4.8, es de alrededor de ± 3 m/km. Además, los resultados obtenidos para el juego de neumáticos de medida 185/65 R15 resultan muy similares a los del juego II de los homologados, por lo que no ha sido posible observar una influencia más allá de la propia variabilidad del ensayo.

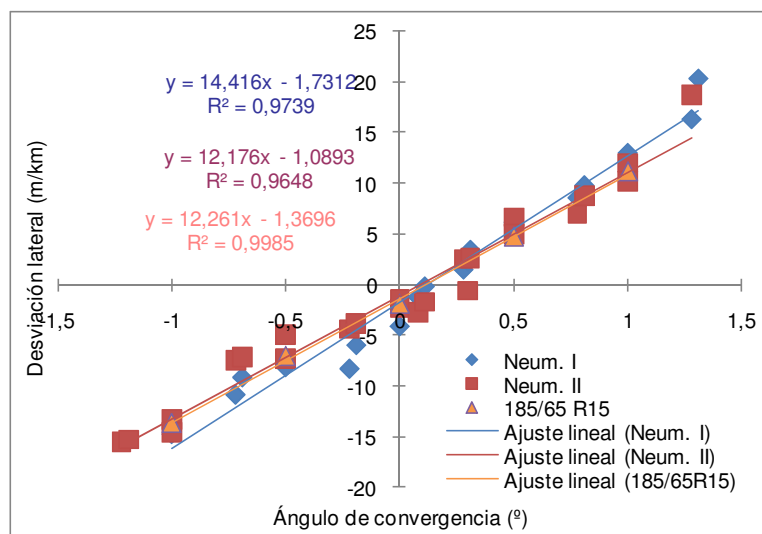


Figura 5.16 Desviación lateral en función de convergencia para distintos neumáticos. P=2 bar

En definitiva, se ha observado que las características del compuesto, dibujo, tamaño o desgaste del neumático no afectan al desplazamiento lateral que este provoca en la placa alineadora. Por ejemplo, el hecho de que el radio del neumático no influya, se puede explicar por que la desviación lateral consiste en el cociente entre desplazamiento lateral y distancia longitudinal recorrida, y ambos son afectados de igual manera por el radio. Del mismo modo, el ancho de la banda de rodadura tampoco tiene una influencia directa sobre la dirección de traslación del neumático, que es la que impone la desviación lateral.

En cuanto a otras características de los neumáticos, como son la conicidad y guiado de capas, se ha demostrado que contribuyen al valor no nulo de la fuerza lateral para ángulos de convergencia nulos (García-Pozuelo, 2008). Se ha podido comprobar que este efecto se reproduce también en el desplazamiento lateral experimentado por la placa. Cabe destacar, sin embargo, que, a la vista de las gráficas anteriores, la diferencia que pudiera existir en cuanto a esta característica entre los juegos de neumáticos ensayados ha resultado ser menor que la variabilidad propia de los ensayos.

5.4.7 Influencia de la masa del vehículo

Como se ha mencionado en el apartado 5.2, la masa adicional que soporta el vehículo hace que se comprima la suspensión respecto a la posición en vacío, modificando por tanto la geometría de la dirección. Por consiguiente, antes de comprobar la influencia de la masa del vehículo en el desplazamiento lateral medido, se debe encontrar la relación existente entre el ángulo de convergencia y el

recorrido de la suspensión. Cabe señalar que en las condiciones en que se realiza el paso de la rueda sobre la placa alineadora, no se registran variaciones de la posición de la suspensión, por lo que esta solo depende de la masa embarcada en el vehículo. Este fenómeno ha sido extensamente estudiado en la bibliografía (Reimpell, Stoll & Betzler, 2000b; Haney, 2003; Klaps & Day, 2005), para ejes con suspensión independiente en cada rueda; en un eje rígido, esta variación es mucho menor.

Al aumentar la carga del vehículo, por un lado se registra una variación geométrica del ancho de vía, debido al giro del brazo de suspensión alrededor de su eje de unión con el bastidor: en su posición horizontal el ancho de vía es máximo, reduciéndose a medida que se separa de la horizontal. Esta modificación de la vía, unida a que la longitud de la barra de acoplamiento de la dirección permanece constante, hace que esta “tire” de la mangueta, la haga girar sobre el pivote, y se altere así el ángulo de convergencia. En la Figura 5.17 se puede observar la variación de la vía debida a la masa, según la bibliografía consultada (Reimpell, Stoll & Betzler, 2000b).

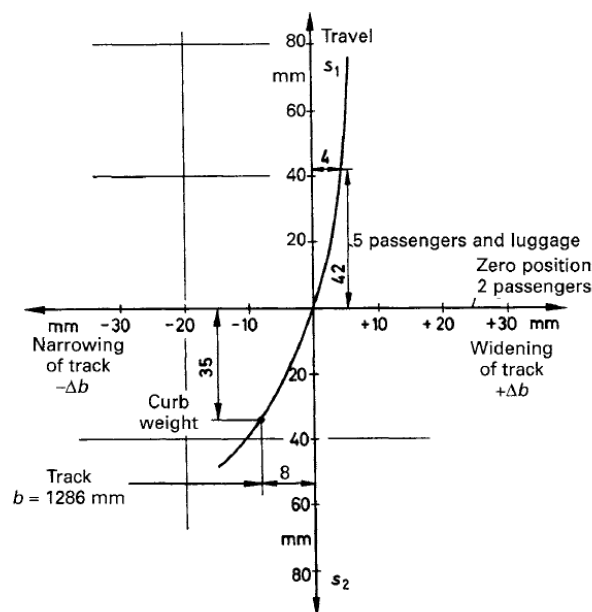


Figura 5.17 Variación de la vía delantera de un vehículo en función de la masa soportada
(Reimpell, Stoll & Betzler, 2000b)

El efecto resultante en cuanto al ángulo de convergencia se detalla en la Figura 5.18, en que se observa el comportamiento para dos tipos de suspensión: una que no presenta prácticamente variación del ángulo de convergencia para una variación del recorrido de la suspensión (la serie etiquetada como “*Linear steer*”), y

otra cuyo comportamiento se aproxima más al del vehículo usado en los ensayos sistemáticos (*"Bump steer"*). En ordenadas se representa la posición del recorrido de la suspensión, y en abscisas el ángulo de convergencia individual de cada rueda, por lo que el efecto sobre la convergencia total del eje sería el doble.

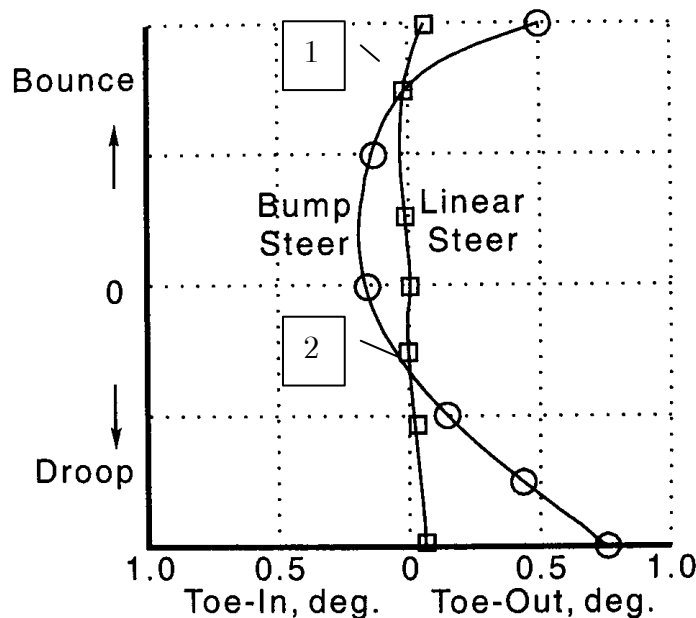


Figura 5.18 Cambio del ángulo de convergencia con el recorrido de la suspensión (Haney, 2003)

De cara a comprobar la influencia de la masa en la geometría de la dirección del vehículo de referencia para los ensayos de esta tesis, se realizaron ensayos experimentales, cuyos resultados fueron similares a los presentados en la bibliografía ya mencionada y se presentan en la Tabla 5-5: se observó una variación de la vía del eje delantero, con la consiguiente variación del ángulo de convergencia debida a la longitud fija de la barra de acoplamiento de la dirección. Esta variación resultó ser de la misma magnitud para cualquier ángulo inicial, y ha sido utilizada para conocer el ángulo de convergencia real en aquellos ensayos realizados con masa adicional.

Se comprobó también que el ángulo de convergencia para el vehículo sin conductor era el mismo que con un conductor de 80 kg, a pesar de observar que el recorrido de la suspensión variaba. Este hecho encuentra explicación a partir de la Figura 5.18: el punto 1 de la misma corresponde a la situación en que el vehículo se encuentra sin conductor, que tiene la misma convergencia que el punto 2, en que se encuentra presente el conductor. En el 1, el brazo de la suspensión se encuentra por encima de la horizontal, y en 2 en su punto simétrico por debajo de la

horizontal. A partir de ahí, una mayor compresión de la suspensión implica una variación de la convergencia, ya siempre en el mismo sentido.

Tabla 5-5 Variación del ángulo de convergencia en función de la masa adicional.

Masa adicional (kg)	Variación convergencia (°)
0	0
125	-0,19
200	-0,22

Por lo tanto, una vez obtenida la variación del ángulo de convergencia respecto al ángulo de convergencia inicial, en función de la masa (Tabla 5-5), se ha pasado a estudiar ya el efecto de la masa o fuerza vertical sobre la relación entre desviación lateral y ángulo de convergencia en sí.

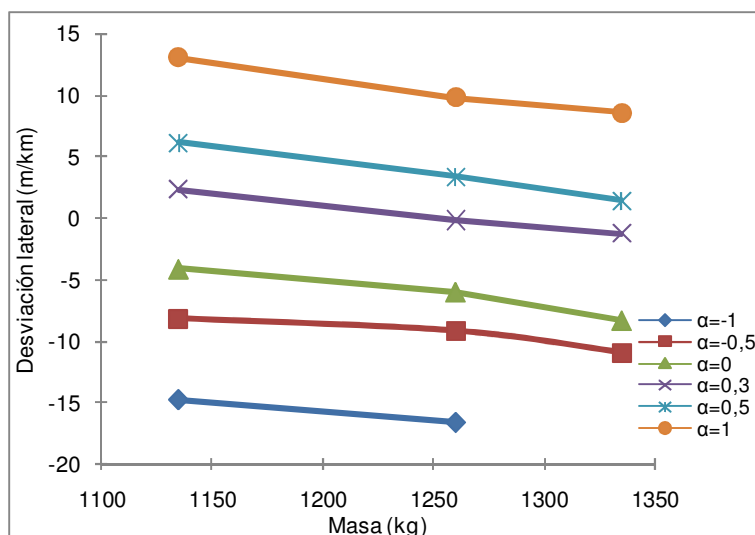


Figura 5.19 Desviación lateral en función de la masa para distintas convergencias iniciales.
Neumáticos I, P=2 bar

En las Figuras 5.19 y 5.20 se puede observar que la desviación lateral muestra una dependencia con la masa, cuando se tiene en cuenta únicamente el ángulo de convergencia medido inicialmente, sin tomar en consideración que la carga adicional añadida al vehículo modifica dicho ángulo de convergencia inicial. Según estos resultados, a mayor masa adicional, las ruedas originan una desviación lateral siempre tendiendo hacia valores de desviación más negativos (como los que produciría una mayor divergencia). En caso de existir una influencia de la masa, la teoría sobre vehículos (Gillespie, 1992) indica que una mayor fuerza vertical implica una mayor capacidad de producir fuerzas laterales en el contacto

neumático-suelo, con lo que no se observaría el efecto contrario que se ha obtenido en las gráficas para convergencias iniciales positivas: es decir, una menor fuerza para masas mayores.

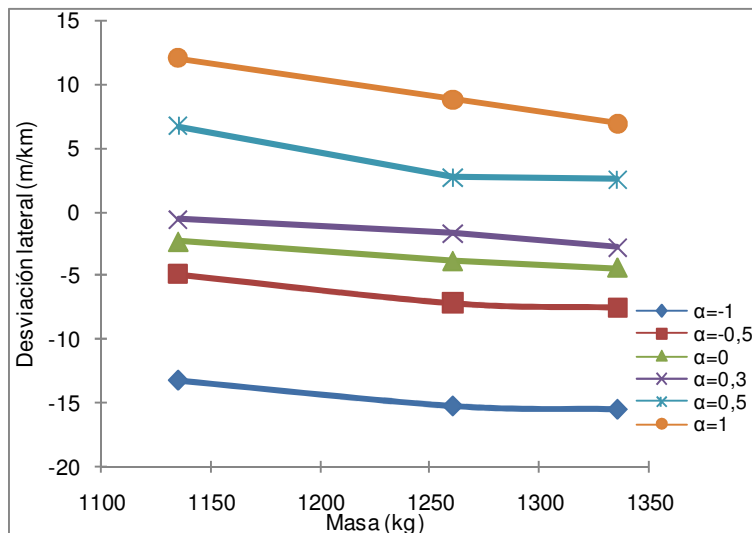


Figura 5.20 Desviación lateral en función de la masa para distintas convergencias iniciales. Neumáticos II, P=2 bar

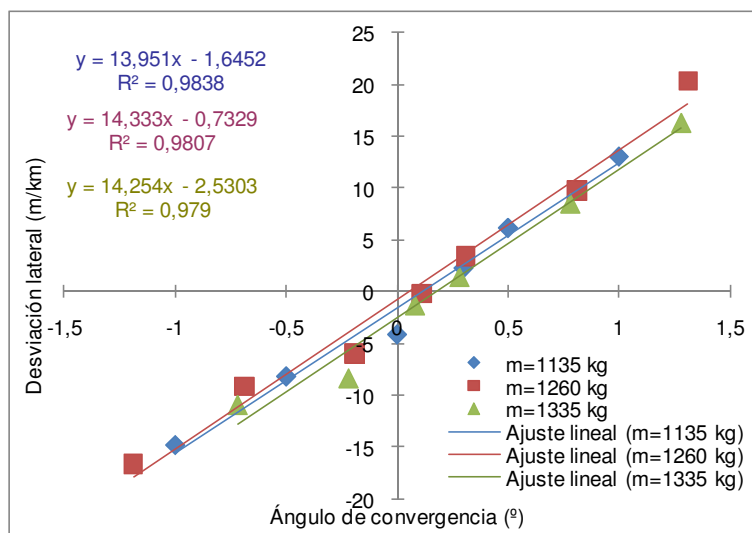


Figura 5.21 Desviación lateral en función de convergencia para distintas masas totales. Neumáticos I, P=2 bar

A diferencia con las Figuras 5.19 y 5.20, en las que se observaba una aparente dependencia de la desviación lateral con la masa, en las Figuras 5.21 y 5.22 se ha aplicado ya el factor de corrección en función de la carga del vehículo indicado en la Tabla 5-5, que hace que el ángulo de convergencia representado no sea el medido inicialmente sin carga, sino el que presenta realmente el eje en el momento de la medida. En dichas figuras se muestra la recta de ajuste de cada

serie de datos, así como la ecuación de esta y el valor del coeficiente de determinación R^2 de Pearson.

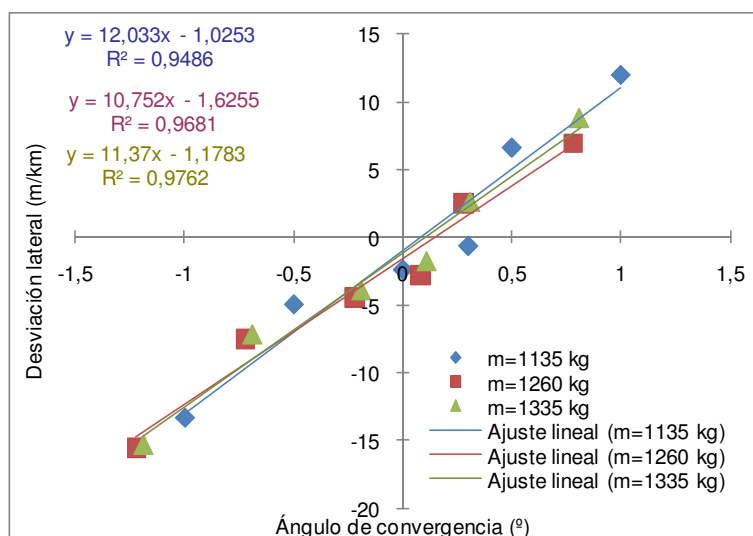


Figura 5.22 Desviación lateral en función de convergencia para distintas masas totales. Neumáticos II, P=2 bar

En base a los resultados obtenidos, no se ha hallado una correlación estadística significativa entre la masa adicional y la desviación lateral, para un ángulo de convergencia constante. Por lo tanto, estas dos magnitudes resultan independientes, o al menos el efecto de la masa sobre la relación convergencia-desviación lateral es inferior frente a la variabilidad intrínseca del ensayo, con lo que se puede afirmar que la carga del vehículo no modifica la relación principal existente entre convergencia y desviación lateral, en las condiciones del ensayo en la ITV (baja velocidad, etc.). Sin embargo, como se ha indicado, la masa embarcada ejerce un efecto indirecto sobre la desviación lateral a través de la geometría de la dirección, debido a que la variación del recorrido de la suspensión modifica el ángulo de convergencia. A pesar de que una mayor fuerza vertical permite desarrollar una mayor fuerza lateral, esta no es necesaria para contrarrestar la ejercida por los muelles de centrado de la placa; es decir, en las circunstancias habituales de la ITV siempre existe un coeficiente de rozamiento entre neumático y superficie de la placa suficiente para vencer la resistencia de los muelles de centrado.

En conclusión, de cara a la importancia de este factor en la ITV, en la propuesta de nuevos criterios de inspección que se formularán en el Capítulo 7, se deberá señalar que el vehículo ha de presentarse en orden de marcha a la inspección, no por una posible influencia de la masa en sí en la desviación lateral,

sino porque modifica el ángulo de convergencia. Por lo tanto, en caso de que el vehículo tenga carga adicional, esta deberá ser retirada, para garantizar que se obtiene la medida siempre en las mismas condiciones de recorrido de la suspensión, evitando así la posibilidad de que una distinta masa sea responsable de una variación del ángulo de convergencia.

5.4.8 Relación entre ángulo de convergencia y desviación lateral

El ángulo de convergencia impone la dirección en que se desplazaría cada rueda si el resto del vehículo no le forzara a trasladarse en otra distinta. Cuando se permite el desplazamiento lateral del suelo sobre el que rueda el neumático, este transmite la cuantía de la desviación lateral que experimentaría, si fuera libre, al suelo.

En la Figura 5.23 se puede observar la clara correlación existente entre el ángulo de convergencia y la desviación lateral. A partir de la misma se puede afirmar que el ángulo de convergencia total del eje es el principal factor determinante del desplazamiento lateral experimentado por la placa alineadora, superando ampliamente a la influencia de cualquier otro de los factores estudiados en este trabajo.

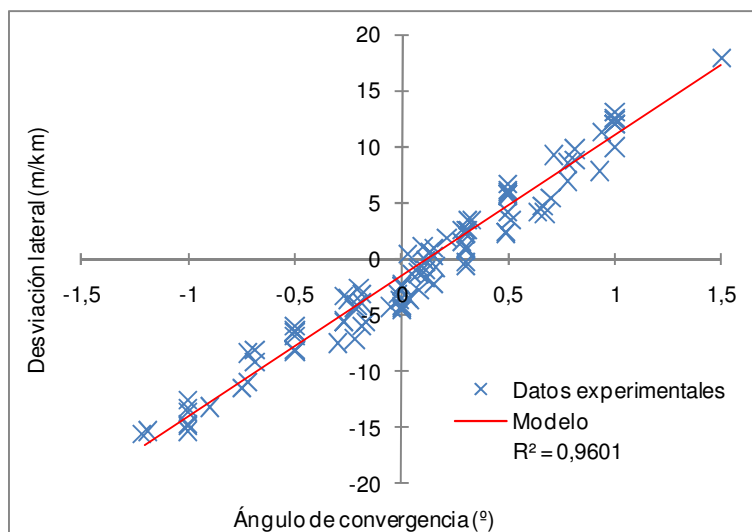


Figura 5.23 Conjunto de datos de los ensayos y ajuste mediante el modelo propuesto

Por ser el factor con mayor influencia en la desviación lateral, el ángulo de convergencia también ha sido el que se ha estudiado más en profundidad en la presente tesis. Se ha desarrollado dentro de esta tesis un modelo que permite estimar, con suficiente precisión, la desviación lateral esperada para un

determinado ángulo de convergencia, independientemente de los demás factores que, como se ha visto, presentan una escasa influencia en el resultado de la medida. Este modelo está enfocado a las condiciones de la ITV (baja velocidad, rodadura casi libre, etc.), y se presenta a continuación.

A partir de la Figura 4.11 se puede establecer la relación entre ángulo de convergencia total por eje (α) y desviación lateral (D_l):

$$D_l = \tan(\alpha) \times 1000 \quad (5-6)$$

Sin embargo, se ha comprobado experimentalmente que esta desviación lateral teórica, a partir de una ecuación meramente cinemática, no se alcanza en un ensayo real mediante placa alineadora. A pesar del reducido valor de la constante de los muelles de centrado y de la fuerza de rozamiento, ambos factores originan un cierto deslizamiento en el contacto neumático-suelo. En base a los ensayos experimentales realizados, se ha llegado a cuantificar la influencia de ambos factores en la desviación lateral originada por el ángulo de convergencia, para el caso de placas que dispongan de muelles de centrado. Para ello ha sido necesario analizar la correlación entre convergencia total del eje y desviación lateral para numerosas series de datos.

Cabe señalar que en la bibliografía consultada no se ha encontrado ningún modelo de desviación lateral, para una placa alineadora convencional, que estime satisfactoriamente el desplazamiento de la placa en función del ángulo de convergencia total del eje.

En la Figura 5.23 se muestran los datos obtenidos de los ensayos de 64 vehículos distintos, con diferentes ángulos de convergencia, presiones, masas, neumáticos, etc. En dicha figura se puede observar una clara relación entre la desviación lateral y el ángulo de convergencia, si bien existe una cierta variabilidad, que será discutida más adelante. Para un determinado ángulo de convergencia, se han obtenido distintos valores de desviación lateral, y como se ha visto en los apartados anteriores, no ha sido posible atribuir esa variabilidad a ningún factor en concreto. Las razones para la misma deben buscarse en factores inherentes al sistema de dirección de los turismos; entre otros, los juegos existentes entre componentes o los elementos elásticos presentes. Debido a estas circunstancias, los ángulos de alineación varían de forma considerable de un momento a otro; por ejemplo, desde el momento en que se mide de forma exacta la alineación mediante el medidor de ángulos (en parado) hasta que el vehículo

circula sobre el alineador al paso (de forma dinámica) tras superar una rampa, varía el recorrido de la suspensión, y con ello (debido a las barras de acoplamiento de la dirección) el ángulo de convergencia. Estos juegos mencionados se hacen más evidentes para ángulos de convergencia próximos a cero, para los que el juego puede hacer que la convergencia pase de tener el valor de un signo al signo opuesto. Si en estos casos, además, existe juego en la posición central de la placa alineadora, debido a un insuficiente ajuste de los muelles de centrado de la misma, la variabilidad podría verse incrementada, ya que la posición inicial de la placa en cada ensayo puede ser distinta.

En la Figura 5.23 se ha representado mediante línea continua el modelo que se ha desarrollado para expresar la relación entre la convergencia total por eje y la desviación lateral. Este modelo parte de un fundamento teórico, que es la ecuación cinemática (5-6), presentada anteriormente, y se basa en los resultados empíricos obtenidos mediante los ensayos experimentales. La diferencia entre ambos se ha encontrado que es debida a los efectos del rozamiento de la placa y los muelles de centrado de la misma. Como resultado del análisis realizado sobre la influencia de ambos efectos, se propone la siguiente expresión:

$$D_l = (\tan(\alpha) \cdot 1000) \cdot 0,87 \cdot K_m^{-0,14} - \frac{F_{roz}}{40} \quad (5-7)$$

donde α es el ángulo de convergencia total del eje (es decir, la suma de las convergencias individuales), K_m es una constante, que toma el valor de la constante del muelle de centrado de la placa en N/mm y F_{roz} es otra constante, que toma el valor de la fuerza de rozamiento, en N. Como se indicó en el apartado 4.1.3, tanto la fuerza de rozamiento como la constante de los muelles son fácilmente medibles experimentalmente mediante un sencillo ensayo de la placa alineadora en cuestión. El resto de constantes constituyen factores de forma. Mediante este modelo, se consigue un coeficiente de determinación R^2 de Pearson igual a 0,9601.

Como se puede observar en la Figura 5.23, la forma de la gráfica es aproximadamente lineal en el rango representado (para $\alpha \leq 1,5^\circ$), al tratarse básicamente de la función tangente (que es prácticamente igual al propio ángulo, para ángulos menores de 25°). Dado que este modelo está enfocado al rango de ángulos de convergencia que pueden encontrarse en un vehículo sin que el conductor perciba que hay un problema grave, y éste se reduce a $\pm 1,5^\circ$, se podía

haber optado por sustituir la función tangente por el propio ángulo de convergencia, pero se ha preferido mantenerla, para conservar el significado físico del modelo.

Al margen de la indicación de la precisión del modelo aportada por el coeficiente de determinación R^2 de Pearson, se ha estudiado la bondad del mismo mediante el método que se expone a continuación. Se ha calculado, para la totalidad de los ensayos realizados, la diferencia entre el valor real de desviación lateral medido y el que resultaría de aplicar el modelo propuesto. Como resultado, se ha obtenido que el intervalo de confianza del 89% es de ± 3 m/km; es decir, en el 89% de los casos la diferencia entre el valor real y el estimado es inferior a 3 m/km, para todo el rango de medidas. En la Figura 5.24 se presentan en forma de histograma las frecuencias con que se obtienen las distintas diferencias en desviación lateral entre los datos experimentales y el modelo propuesto. La variabilidad que se ha observado en la medida de desviación lateral mediante placa alineadora quedaría en todo caso comprendida dentro de este intervalo de confianza calculado, por lo que el modelo propuesto se puede considerar adecuado para el propósito para el que se ha planteado, teniendo en cuenta además la precisión habitual de los alineadores al paso.

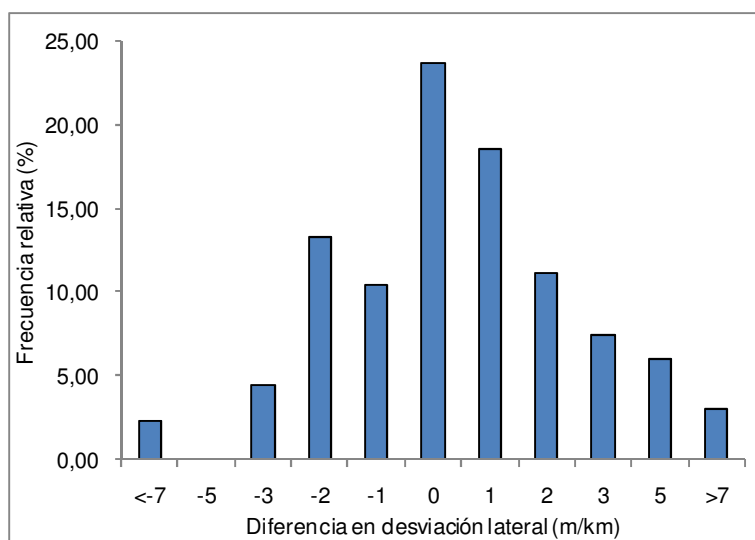


Figura 5.24 Diferencia entre datos experimentales y modelo de desviación lateral

Un aspecto a tener en cuenta a la hora de utilizar el modelo propuesto es que, según se explicó en el apartado 4.3, el desplazamiento de la placa alineadora se debe tanto a la contribución del ángulo de convergencia de la rueda que pasa sobre ella, como al de la rueda opuesta, y estas son las magnitudes físicas que como tales intervienen; el ángulo de convergencia total, como suma de los de

ambas ruedas, no tiene ningún significado físico a efectos de producción de desviación lateral, si bien es la magnitud que se suele dar habitualmente como resultado de la medición de la alineación. El desplazamiento total sería una combinación de los producidos por ambas ruedas, por lo que en realidad la desviación se debería escribir de la forma siguiente:

$$D_l = (\tan(\alpha_i) + \tan(\alpha_d)) \cdot 1000 \cdot 0,87 \cdot K_m^{-0,14} - \frac{F_{roz}}{40} \quad (5-8)$$

donde α_i y α_d son los ángulos de convergencia de la rueda izquierda y rueda derecha respectivamente.

Como se puede observar en la Ecuación (5-8), aparece la suma de las tangentes de las convergencias individuales de cada rueda, y no la tangente de la suma (ángulo de convergencia total del eje), que escrita en función de las convergencias individuales quedaría como sigue:

$$D_l = \left(\frac{\tan(\alpha_i) + \tan(\alpha_d)}{1 - \tan(\alpha_i) \cdot \tan(\alpha_d)} \cdot 1000 \right) \cdot 0,87 \cdot K_m^{-0,14} - \frac{F_{roz}}{40} \quad (5-9)$$

Se ha calculado el error que se cometería en caso de no usar la Ecuación (5-8), en función de las convergencias individuales, sino la (5-7), y este resulta ser inferior al 0,6 % para ángulos de convergencia de hasta 1,5°, por lo que, dentro del rango de ángulos a esperar en la ITV, se podrían efectuar los cálculos con la Ecuación (5-7) sin cometer un error considerable.

Sin embargo, es posible realizar el cálculo en función del ángulo de convergencia total sin incurrir ni siquiera en ese error, teniendo en cuenta que, como se ha explicado también, el ángulo de convergencia total por eje se reparte a partes iguales entre las dos ruedas, siempre que se deje libre el volante durante la realización del ensayo, por lo que la Ecuación (5-8) se puede escribir como sigue:

$$D_l = \left((2 \cdot \tan(\frac{\alpha_t}{2})) \times 1000 \right) \cdot 0,87 \cdot K_m^{-0,14} - \frac{F_{roz}}{40} \quad (5-10)$$

donde α_t es el ángulo de convergencia total del eje.

En la Tabla 5-6 se presenta el cálculo de la desviación lateral mediante las tres ecuaciones anteriores (5-8, 5-9 y 5-10) para una muestra de ensayos, así como sus diferencias.

Tabla 5-6 Diferencias en el cálculo de la desviación lateral según las distintas ecuaciones propuestas

Ensayo	α izda (°)	α dcha (°)	α total (°)	Desviación lateral			Diferencias con Ec. 5-8	
				Ec. 5-8 (m/km)	Ec. 5-9 (m/km)	Ec. 5-10 (m/km)	Ec. 5-9 (m/km)	Ec. 5-10 (m/km)
1	0,13	0,16	0,29	2,12666	2,12669	2,12666	0,00230%	-0,00002%
2	0,21	0,17	0,38	3,25219	3,25224	3,25219	0,00517%	-0,00006%
3	0,26	0,3	0,56	5,50325	5,50342	5,50325	0,01664%	-0,00009%
4	0,31	0,33	0,64	6,50374	6,50398	6,50374	0,02494%	-0,00002%
5	0,37	0,35	0,72	7,50423	7,50458	7,50423	0,03552%	-0,00003%
6	0,42	0,42	0,84	9,00498	9,00555	9,00498	0,05645%	0,00000%
7	0,63	0,68	1,31	14,88319	14,88533	14,88319	0,21384%	-0,00031%
8	0,85	0,84	1,69	19,63618	19,64077	19,63618	0,45987%	-0,00002%
9	-0,33	-0,35	-0,68	-10,00398	-10,00428	-10,00398	-0,02992%	0,00003%
10	-0,62	-0,63	-1,25	-17,13275	-17,13461	-17,13275	-0,18604%	0,00001%
11	-0,79	-0,82	-1,61	-21,63551	-21,63949	-21,63551	-0,39747%	0,00014%

Como se puede observar en la tabla, la diferencia relativa con la ecuación exacta (5-8) obtenida mediante la Ecuación 5-10 es considerablemente inferior a la obtenida con la 5-9, por lo que finalmente es la Ecuación 5-10 la que representa el modelo que se propone.

Por último, a partir de la Ecuación (5-10), es posible obtener el valor aproximado del ángulo de convergencia que produce una determinada desviación lateral, mediante la expresión siguiente:

$$\alpha_i = 2 \cdot \arctg \left(\frac{D_l + \frac{F_{roz}}{40}}{1740 \cdot K_m^{-0,14}} \right) \quad (5-11)$$

Esta expresión será usada para uno de los criterios de inspección propuestos en el Capítulo 7 de esta tesis, proporcionando un intervalo de confianza del 89% de $\pm 0,36^\circ$ para el ángulo de convergencia así estimado, derivado del intervalo de ± 3 m/km en que se aproxima la desviación lateral.

Se ha realizado una serie de ensayos de validación del modelo propuesto de desviación lateral en función del ángulo de convergencia total por eje, obteniendo los resultados que se detallan en la Tabla 5-7. En la segunda columna se indica el ángulo de convergencia medido mediante el medidor de ángulos convencional, en la tercera la desviación lateral registrada por el alineador al paso, y en la última el ángulo de convergencia estimado a partir del modelo de la Ecuación (5-11).

Tabla 5-7 Ensayos de validación del modelo de desviación lateral propuesto

Ensayo	Desviación		
	α medido (°)	lateral medida (m/km)	α estimado (°)
1	-1,00	-14,82	-1,07
2	-0,75	-13,09	-0,93
3	-0,50	-8,58	-0,57
4	-0,25	-4,13	-0,21
5	0,00	-3,66	-0,17
6	0,25	-0,57	0,07
7	0,50	5,69	0,58
8	0,75	4,03	0,44
9	1,00	10,07	0,92
10	1,00	12,14	1,09
11	0,50	2,80	0,34
12	0,00	-2,23	-0,06
13	0,02	-2,36	-0,07
14	-0,32	-4,05	-0,20
15	-1,18	-16,99	-1,24
16	0,15	0,94	0,20
17	-0,08	-2,00	-0,04
18	-0,22	-4,20	-0,22
19	0,23	1,87	0,27

En la Figura 5.25 se muestra la relación entre el ángulo de convergencia medido y el estimado, para esta serie de ensayos de validación. Dada la correcta aproximación entre ambos valores, se puede dar por validado el modelo.

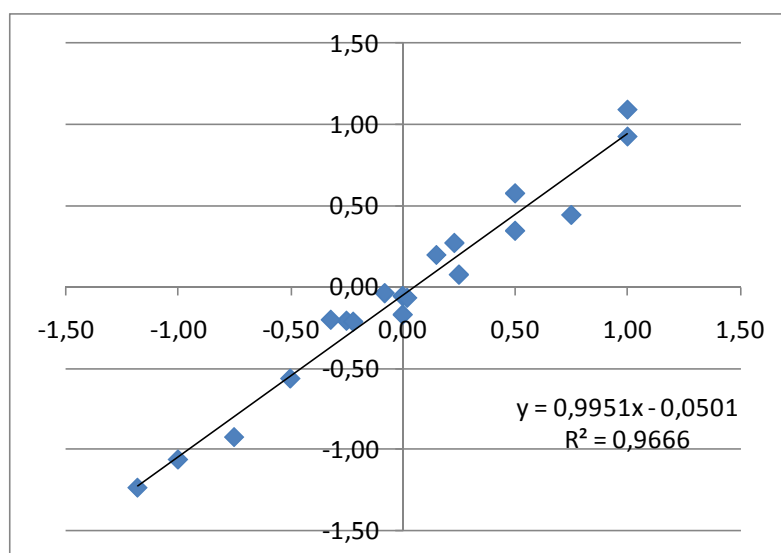


Figura 5.25 Relación entre convergencia medida y estimada

En definitiva, se ha comprobado que la desviación lateral medida con la placa alineadora muestra una gran correlación con el ángulo de convergencia total

del eje. La influencia del resto de factores estudiados sobre la desviación lateral resulta inferior a la propia variabilidad de la medida, por lo que se puede afirmar que, a los efectos de la inspección mediante la placa alineadora, la desviación lateral depende exclusivamente del ángulo de convergencia total del eje.

Capítulo 6 Relación entre placa alineadora convencional y placa dinamométrica

Como ya se ha indicado en el apartado 5.3, al mismo tiempo que se realizaron los ensayos de desviación lateral analizados en el Capítulo 5, se registró también, para cada una de las medidas, la fuerza lateral transmitida por el neumático al suelo fijo, por medio de la placa dinamométrica descrita en el apartado 5.1, y que se muestra en la Figura 6.1. Estas medidas de fuerza lateral fueron la base experimental para el desarrollo de la tesis doctoral de García-Pozuelo (García-Pozuelo, 2008), pero se ofrece aquí un análisis de las características más relevantes de la medida con placa dinamométrica, con el objetivo de hallar la relación existente entre las medidas de desviación y fuerza lateral, que será necesaria para la Propuesta II de nueva metodología de inspección de la dirección en la ITV (presentada en el apartado 7.3). Tanto el diseño de experimentos como la metodología de ensayo presentados para la medida de desplazamiento son los mismos que para la medida de fuerza lateral.

En cuanto al análisis de los datos, en la Figura 6.2 se observa el registro de un ensayo de medida de fuerza lateral realizado mediante la placa dinamométrica. Se ha elegido como valor de fuerza lateral representativo de cada repetición el valor medio de la *meseta*, según se indica en la figura. Al igual que para la medida

de desplazamiento, el valor de cada ensayo se obtiene como la media de distintas repeticiones.



Figura 6.1 Placa dinamométrica utilizada

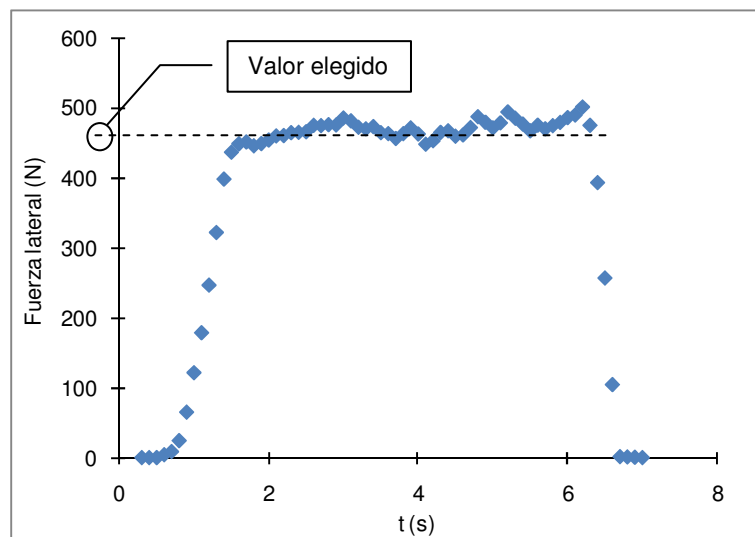


Figura 6.2 Medida de fuerza lateral (Neumáticos II, $\alpha=-1^\circ$, $P=2$ bar, $m= 1260$ kg)

Se ha podido comprobar que existen diferencias importantes en los mecanismos de interacción entre neumático y suelo en la placa alineadora y la dinamométrica. Estas diferencias se originan, fundamentalmente, por la capacidad de “descargar” esfuerzos y deformaciones laterales en la placa alineadora, algo que no ocurre en la dinamométrica, que, en ese sentido, tendría las condiciones habituales de circulación sobre suelo seco. Por su parte, las condiciones de la placa alineadora no se encontrarían durante la conducción de un vehículo, ya que normalmente no se puede liberar únicamente la coacción lateral del suelo sobre los neumáticos, manteniendo la longitudinal. En este sentido las condiciones de

desplazamiento sobre la placa alineadora serían equivalentes a las de circular sobre una placa de hielo, con los efectos de reducido rozamiento únicamente en dirección transversal. Esta característica de las placas alineadoras permite aislar el efecto exclusivamente del ángulo de convergencia.

A diferencia de la medida de desplazamiento en placa alineadora, en que se produce un incremento progresivo del desplazamiento debido a la convergencia a medida que el neumático avanza, en la placa dinamométrica el valor de la medida es prácticamente constante, excepto durante los periodos transitorios de entrada y salida. Esto es así, ya que el vehículo ha rodado previamente una longitud superior a la de relajación, y la transición del suelo anterior a esta se efectúa sin producirse la “relajación” de los esfuerzos en el neumático. A partir de ese momento, toda la fuerza que se podría generar adicionalmente por la convergencia es liberada continuamente en forma de deslizamiento sobre la superficie de la placa, ya que ni el neumático ni el suelo pueden variar en absoluto su posición transversal. En todo caso, se puede dar lugar a una pequeña relajación en la estrecha holgura que pueda existir entre la placa y el suelo circundante. Esta holgura se encuentra entre 1 y 2 mm, como se puede observar en la Figura 6.3, y la relajación que se produciría en la misma se puede recuperar bajo la forma de un ligero incremento progresivo de la fuerza lateral a lo largo de la placa dinamométrica.

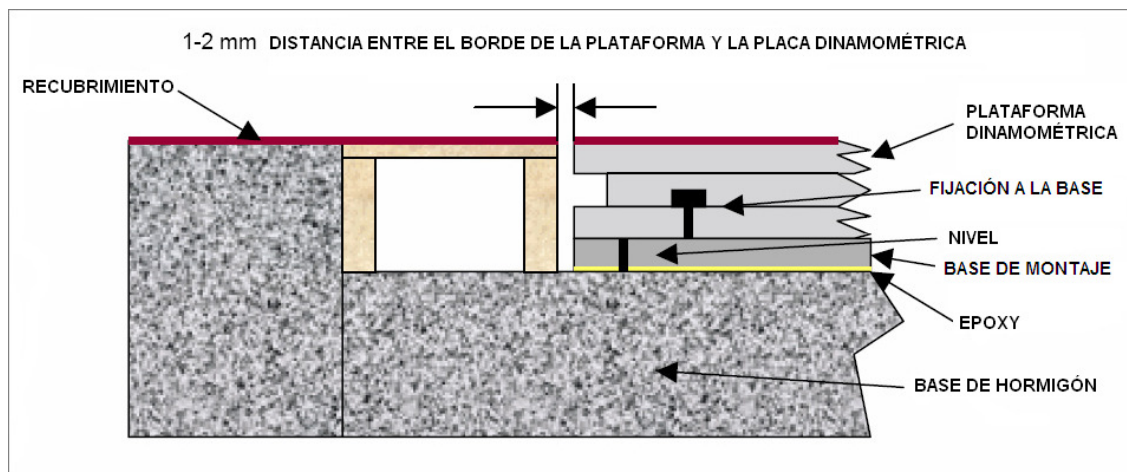


Figura 6.3 Esquema de instalación de placa dinamométrica

6.1 Relación alineación-fuerza lateral

En principio, y para un neumático sin defectos, siempre que el eje de giro de la rueda (mangueta) no sea perfectamente paralelo al suelo y perpendicular a la dirección de avance del vehículo, se producirá una fuerza lateral. En general, los neumáticos no proporcionan ni fuerza lateral ni longitudinal si no se deforman en dichas direcciones. Esta deformación ocurre, o bien cuando se le aplica a la rueda un par de fuerzas o cuando se le obliga a rodar en una dirección distinta a la del vehículo.

En el próximo apartado, se indica brevemente la influencia de los factores anteriormente discutidos para la placa de desplazamiento, pero en este caso en cuanto a la producción de fuerza lateral.

6.1.1 Influencia de los distintos parámetros en la fuerza lateral

Para empezar, cabe destacar el parámetro de la “longitud de relajación” (mencionado en el apartado 2.4.3), el cual únicamente afecta a la medida mediante placa dinamométrica. Para realizar una medida correcta de la fuerza que desarrollaría el neumático en circulación es preciso que, en las condiciones del ensayo, este haya recorrido una longitud mínima (denominada “de relajación”), con el objeto de desarrollar los esfuerzos laterales del estado estacionario. Esta distancia se suele considerar suficiente entre 1/2 y 1 vuelta entera del neumático (Gillespie, 1992; Hall et al., 2003; Blundell & Harty, 2004b), lo que supone alrededor de 2 m lineales para un turismo convencional. De cualquier modo, para los ensayos realizados se fijó un recorrido inicial considerablemente mayor.

No obstante, se podría plantear la posibilidad de disponer una placa de relajación similar a las de las placas alineadoras, inmediatamente antes de la placa dinamométrica. Esto haría que la medida dejara de verse influida por la distancia recorrida con anterioridad a la placa, y la forma de la gráfica de la medida pasaría a ser similar a la de una medida de desplazamiento lateral, con un incremento progresivo desde un valor inicial cero, hasta un máximo que estaría en función de la longitud de la placa y de la adherencia entre neumático y placa.

En cuanto al conjunto de factores analizados para el caso de la medida de desplazamiento, a continuación se resume su influencia en la medida con placa dinamométrica.

Ángulo de convergencia

El ángulo de convergencia es el factor que determina en mayor medida la fuerza lateral producida por el neumático cuando el vehículo circula en línea recta.

La relación entre el ángulo de convergencia y la fuerza lateral ha sido extensamente objeto de investigación en la bibliografía (Milliken & Milliken, 1995; Dixon, 1996; Johnson, 1996; SAE, 1998; Pacejka, 2002; Haney, 2003), y depende de manera importante de las características de cada neumático en particular.

En la Figura 6.4 se tiene una gráfica de los ensayos realizados, en la que se observa la relación aproximadamente lineal entre convergencia y fuerza lateral. En concreto, el coeficiente R^2 es de 0,95. Esta relación lineal se mantiene hasta ángulos de 2° de convergencia en cada rueda (Pacejka, 2002), y da lugar a que se defina el coeficiente denominado en inglés “*cornering stiffness*” (rigidez a deriva), como la pendiente de la recta que relaciona las dos magnitudes.

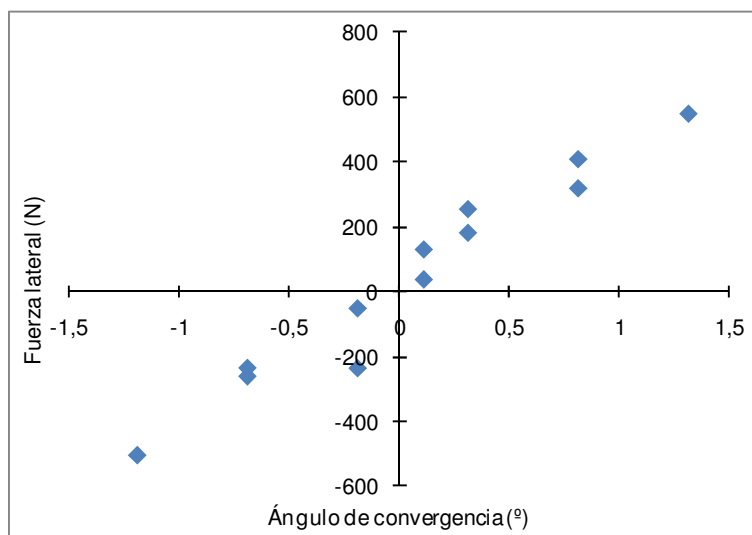


Figura 6.4 Fuerza lateral en función de convergencia. P=2 bar, m=1260 kg

Fuerza vertical

A diferencia de lo que se ha observado en los ensayos de desplazamiento mediante placa alineadora, es conocida la influencia de la fuerza vertical ejercida sobre el neumático en la fuerza lateral que este es capaz de desarrollar. Por lo tanto, vehículos de distinta masa ajustados con los mismos ángulos de dirección pueden obtener resultados de medida de fuerza lateral distintos.

Esta influencia da lugar a que el anteriormente mencionado coeficiente “*cornering stiffness*” se suele adimensionalizar dividiéndolo por la fuerza vertical,

obteniendo un coeficiente de rigidez adimensional, que permite describir, dentro del rango lineal, la característica en cuanto a producción de fuerza lateral de cada neumático (Aparicio, Vera & Díaz, 1995).

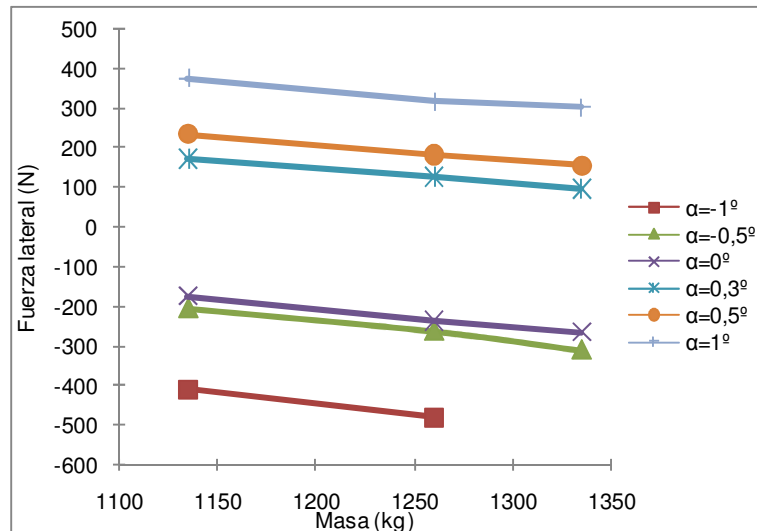


Figura 6.5 Fuerza lateral en función de la masa para distintas convergencias iniciales. Neumáticos I, P=2 bar

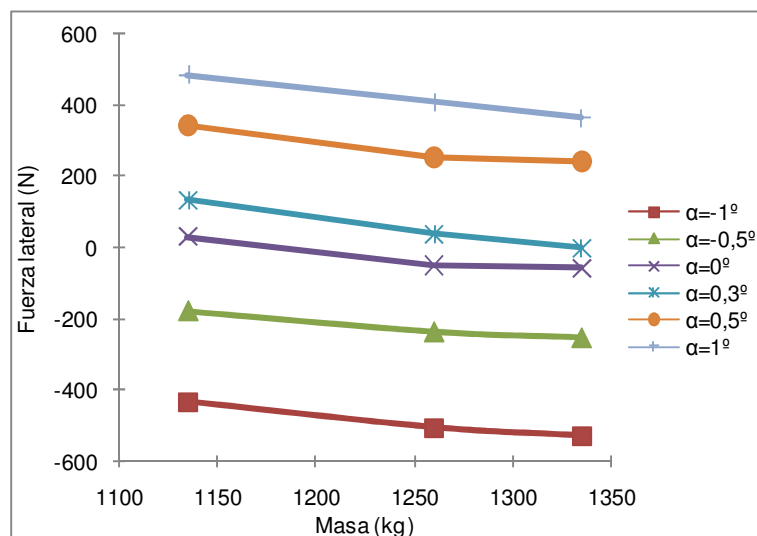


Figura 6.6 Fuerza lateral en función de la masa para distintas convergencias iniciales. Neumáticos II, P=2 bar

En las Figuras 6.5 y 6.6 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos experimentales llevados a cabo para estudiar la influencia de la fuerza vertical sobre la fuerza lateral que el neumático es capaz de desarrollar, para distintos ángulos de convergencia iniciales (es decir, los ajustados en el vehículo cuando este no cuenta con carga adicional). A partir de dichas gráficas se podría concluir que las distintas fuerzas verticales ejercidas sobre el neumático (consecuencia de las

distintas masas embarcadas en el mismo) tienen una influencia significativa en la fuerza lateral registrada en la placa dinamométrica. Así, para ángulos de convergencia cero o negativos se observa una mayor capacidad para desarrollar fuerza lateral cuanto mayor es la fuerza vertical. Sin embargo, para ángulos de convergencia positivos se observa el efecto contrario: menor fuerza lateral cuanto mayor fuerza vertical.

Para explicar estos resultados, en principio anómalos, se recuerda que, como se ha comprobado experimentalmente, los ángulos de convergencia inicialmente ajustados en el vehículo sin carga adicional experimentan una variación a medida que se aumenta la carga sobre el vehículo, como consecuencia de la modificación del recorrido de la suspensión. Por lo tanto, en las gráficas de las Figuras 6.7 y 6.8 se muestran los resultados de la relación obtenida entre la fuerza lateral medida en placa dinamométrica y las distintas masas, con sus respectivas rectas de ajuste, para los ángulos de convergencia efectivos en carga. Como se puede observar, la diferencia entre las distintas curvas de regresión es mínima. Si bien no se llega a observar la relación establecida en la bibliografía (Gillespie, 1992), según la cual la fuerza lateral se incrementa al aumentar la fuerza vertical, al menos no se observa el efecto contrario tan claramente como cuando no se aplica el ajuste de ángulo de convergencia en función de la masa.

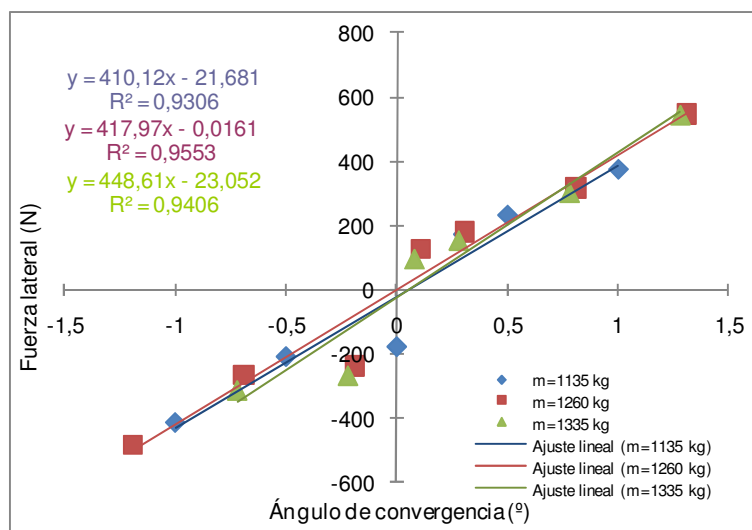


Figura 6.7 Fuerza lateral en función de convergencia para distintas masas totales. Neumáticos I, P=2 bar

En todo caso, el efecto de la fuerza vertical sobre la relación entre convergencia y fuerza lateral resulta más perceptible cuanto mayor es la sollicitación sobre el neumático, por ejemplo, cuando se tienen ángulos de

convergencia mayores. En dichas condiciones se hace patente la mayor capacidad de desarrollar esfuerzos laterales cuanto mayor es la fuerza vertical ejercida por el vehículo. Cabe recordar que, incluso para ángulos de convergencia elevados, las condiciones de sollicitación del neumático sobre la placa alineadora son claramente menores, debido a la ausencia de restricción por parte del suelo para su desplazamiento lateral.

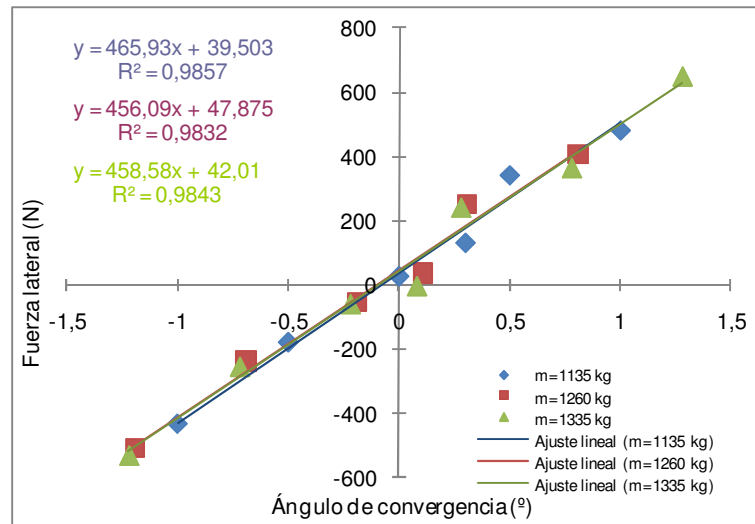


Figura 6.8 Fuerza lateral en función de convergencia para distintas masas totales. Neumáticos II, P=2 bar

Características del neumático

A partir de los ensayos realizados, se ha observado que la relación entre fuerza lateral y convergencia se ve influida por las características de cada neumático utilizado, lo cual también se hace más patente (al igual que los otros factores que determinan el contacto neumático-suelo, como la presión, temperatura, etc.) cuando se somete el neumático a altas sollicitaciones, como pueden ser ángulos de convergencia elevados. Dentro de estas características, los compuestos de caucho empleados, el tamaño o el dibujo son comúnmente citadas en la bibliografía (Heisler, 2002) como las más relevantes en cuanto a transmisión de esfuerzos. En la Figura 6.9 se puede observar cómo, para los ensayos realizados, el juego de neumáticos II presenta una mayor capacidad de generar fuerzas laterales.

Por otro lado, las características de conicidad y guiado de capas de cada neumático provocan una fuerza lateral permanente que hace que el valor de la misma no sea nulo para un ángulo de convergencia de 0° (García-Pozuelo, 2008).

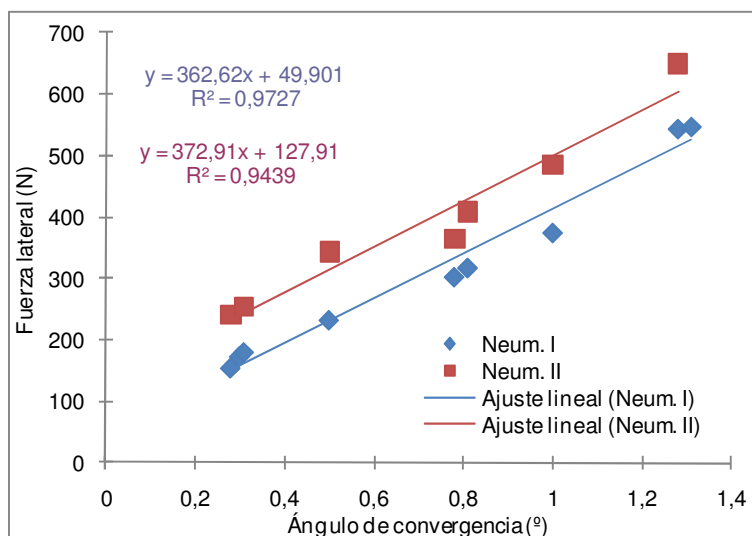


Figura 6.9 Influencia del neumático en la relación entre convergencia y fuerza lateral. P=2 bar

Presión de inflado

Como era de esperar, y en consonancia con la bibliografía (Haney, 2003) (aunque en el presente caso se trata de baja velocidad, en las condiciones de la ITV), se ha podido apreciar una influencia de la presión de inflado en la medida de fuerza lateral mediante la placa dinamométrica, situación esta en que el neumático se encuentra más solicitado que en la placa alineadora. En esta última, el nivel de sollicitación lateral es tan reducido que prácticamente cualquier neumático a cualquier presión proporciona un contacto suficiente con el suelo para transmitir a la placa el movimiento lateral que experimentaría debido a su dirección de rotación si no se encontrara impedido por su unión al vehículo.

En la Figura 6.10 se puede observar cómo, incluso para ángulos de convergencia reducidos, se hace patente una mayor capacidad de transmisión de fuerza lateral en función de la presión.

En la Figura 6.11 se visualiza este efecto de la presión de inflado sobre la relación entre fuerza lateral y ángulo de convergencia, que hace que la fuerza lateral desarrollada para un mismo ángulo de convergencia dependa de la presión. En concreto, en este caso se observa una mayor pendiente de la recta de ajuste cuanto mayor es la presión de inflado. En ensayos adicionales se observó que en caso de seguir aumentando la presión, y alejándose de la recomendada, se registra una reducción de la capacidad de transmitir fuerzas laterales.

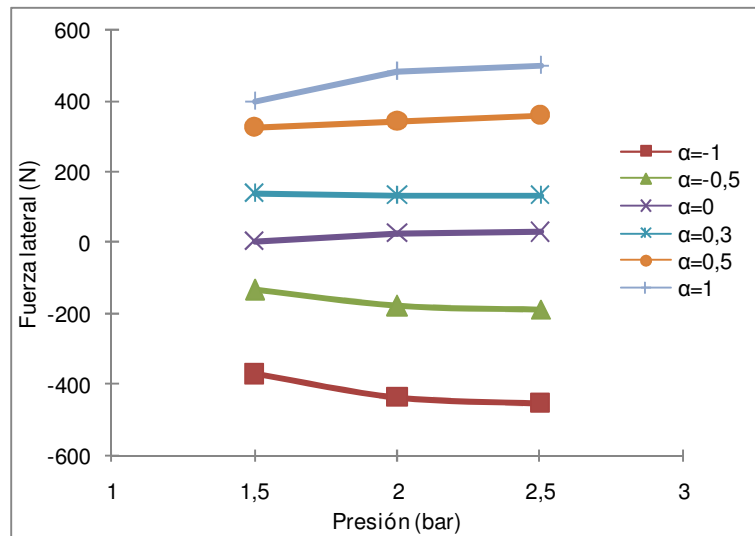


Figura 6.10 Fuerza lateral en función de la presión para distintas convergencias. Neumáticos II, $m=1135$ kg

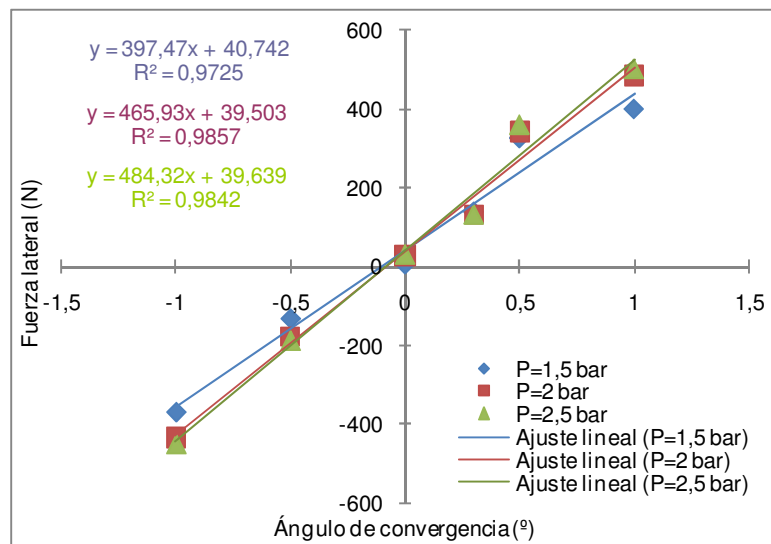


Figura 6.11 Fuerza lateral en función de convergencia para distintas presiones. Neumáticos II, $m=1135$ kg

Ángulo de caída

Como ya se adelantó en cuanto a su efecto sobre el desplazamiento, la influencia del ángulo de caída sobre la producción de fuerza lateral por el neumático es mucho menor que la ejercida por el ángulo de convergencia; según ha sido demostrado por numerosos autores (Gillespie, 1992; Smith, 2004), alrededor de un orden de magnitud menor. Algunos llegan incluso a cuantificarlo como veinte veces inferior por cada grado que el del ángulo de convergencia (Blundell & Harty, 2004b).

En la Figura 6.12 se puede observar cómo, para tres ángulos de caída distintos (-5 , 0 y $+5^\circ$), la fuerza lateral varía mínimamente entre los tres al ir variando el ángulo de deriva, el cual, por el contrario, sí produce una notable variación de la fuerza. Esta figura ha sido obtenida de los datos proporcionados por el software MF-Tool (Delft Tyre), correspondientes a ensayos de un neumático Michelin MXT 175/70 R13, sobre superficie equivalente a asfalto seco, a una presión de 2 bar.

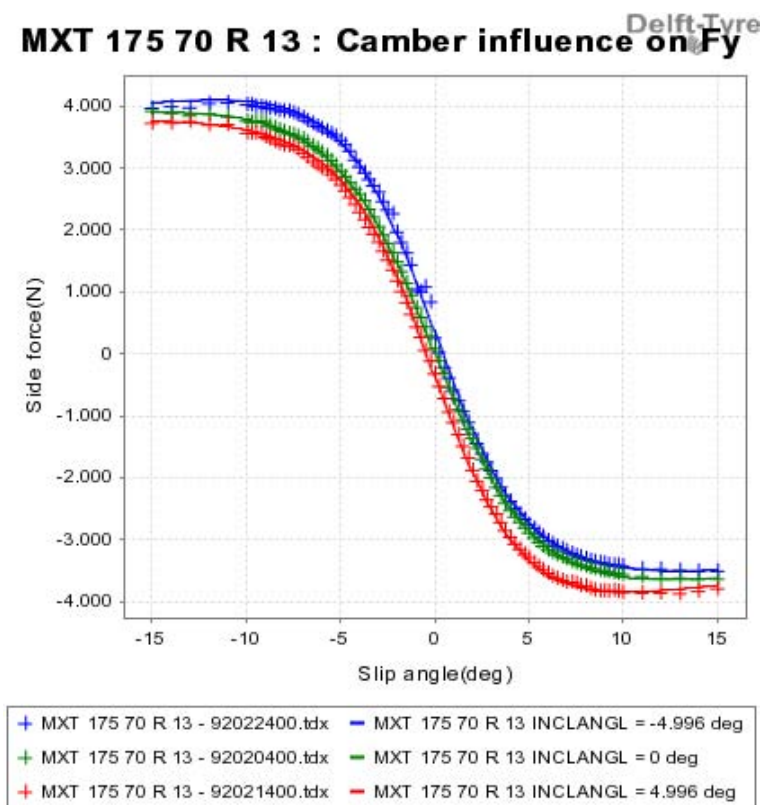


Figura 6.12 Efecto del ángulo de caída sobre la fuerza lateral

Como se indicó, el ángulo de caída no es modificable en la mayoría de los turismos, por lo que no se pudo comprobar experimentalmente su efecto en la fuerza lateral.

Superficie de rodadura

Al igual que la presión de inflado y las características del neumático, la superficie de rodadura juega un papel importante en la transmisión de esfuerzos desde el neumático al suelo, cobrando también, al igual que estas, mayor relevancia a altas solicitaciones.

Mediante ensayos de comprobación se ha observado experimentalmente (Figura 5.11) que al variar el coeficiente de rozamiento entre neumático y placa, se

ve afectada la fuerza lateral medida. Como se adelantó ya en el apartado 5.4.3, se han efectuado ensayos con coeficientes de rozamiento extremos: desde una capa de aceite, hasta superficie de papel de lija, obteniendo alguno de los resultados que se mostraron en el citado apartado. Si bien en el ensayo de desviación lateral mediante placa alineadora no se requiere desarrollar una elevada fuerza de rozamiento para vencer la resistencia al desplazamiento lateral de la placa, cualquier modificación del coeficiente de rozamiento de la superficie de rodadura hace variar la fuerza lateral medida mediante placa dinamométrica.

Velocidad de paso

No ha sido posible comprobar experimentalmente la influencia de la velocidad en la medida de fuerzas en un rango amplio, ya que las características de las instalaciones no lo permiten. No obstante, este efecto resulta despreciable para velocidades inferiores a 10 km/h, y no mayor de una variación del 5% de la fuerza lateral para velocidades de hasta 30 km/h (Díaz et al., 2008), por lo que las condiciones de ensayo en la ITV quedarían ampliamente comprendidas dentro de estos márgenes, y no sería relevante el efecto de este factor sobre la medida.

Temperatura

Como ya se adelantó en el apartado 5.4.1, no se encontró ningún efecto de la temperatura del neumático en la producción de fuerza lateral, dentro del rango habitual de funcionamiento de un vehículo de turismo, y para los ángulos de convergencia total del eje de hasta 3°.

6.1.2 Diferencias con la medida con placa alineadora

En definitiva, se han encontrado las diferencias indicadas en el apartado anterior para cada uno de los distintos parámetros que influyen en la medida, según se emplee una placa alineadora o una placa dinamométrica. A pesar de las mismas, se ha comprobado que el elemento que determina principalmente el resultado de la medida mediante ambos dispositivos es el ángulo de convergencia total del eje (como se ha podido observar en las Figuras 5.23 y 6.4).

El resultado de desviación lateral que se obtiene de la placa alineadora ha mostrado una elevada independencia de los factores que determinan la capacidad máxima de transmisión de esfuerzos entre neumático y suelo. Como se ha indicado, este hecho es debido a que las condiciones en que se desarrolla el ensayo suponen una baja sollicitación para el neumático, ya que este se encuentra liberado de

coacción al movimiento en la dirección lateral, que es la que impone el ángulo de convergencia. La relación entre la desviación lateral y la convergencia depende fundamentalmente de la geometría de la dirección. En el otro extremo, en el ensayo mediante placa dinamométrica, no se permite el desplazamiento lateral del neumático, por lo que el nivel de deslizamiento lateral de este es mucho mayor, y de este modo entran en juego en mayor medida los factores que determinan la máxima capacidad de transmisión de fuerzas laterales por el neumático. Por lo tanto, la placa dinamométrica es un instrumento adecuado para efectuar un diagnóstico global de las aptitudes en cuanto a dinámica lateral del conjunto vehículo-neumático, puesto que tiene en cuenta todos los factores que intervienen en la misma, pero la capacidad para estimar únicamente el ángulo de convergencia del vehículo ensayado resulta, por ello, menor que la que ofrece la placa alineadora. Esto es así ya que la relación entre fuerza lateral y convergencia depende en gran medida (como se verá en el siguiente apartado) de, entre otras, la rigidez a deriva de cada neumático (la cual depende a su vez de la presión de inflado, etc.), siendo por lo tanto menos directa que la existente entre desviación lateral y convergencia. Esta diferencia se puede visualizar por las expresiones de los modelos de desviación y fuerza lateral presentados en esta tesis, y los factores de que depende cada una.

6.1.3 Modelo de fuerza lateral

De forma general, existen numerosos estudios que proponen modelos para la relación entre los ángulos de alineación de las ruedas, principalmente convergencia y caída, y la fuerza lateral. La forma más básica de los mismos, y para la zona de valores de convergencia próximos a cero, en que dicha relación es lineal, sería la representada por la siguiente expresión (Dixon, 1996):

$$F_y = C_{conv}\alpha + C_{ca}\gamma \quad (6-1)$$

donde C_{conv} y C_{ca} son coeficientes “de rigidez” a convergencia y a caída respectivamente, que se deben determinar para cada combinación de neumático, superficie de rodadura, presión, y fuerza vertical.

Si, por medio de ensayos, se obtiene la relación que tienen con la fuerza vertical (F_z), se convierten en los coeficientes adimensionalizados c_{conv} y c_{ca} , respectivamente, de mayor versatilidad a la hora de modelizar la fuerza lateral para distintas fuerzas verticales:

$$F_y = F_z(c_{conv}\alpha + c_{ca}\gamma) \quad (6-2)$$

A partir de las medidas de fuerza obtenidas simultáneamente a los ensayos de desplazamiento, García-Pozuelo (García-Pozuelo, Díaz & Boada, 2009) desarrolla un modelo para predecir la fuerza lateral que ejerce un neumático en las condiciones en que se desarrolla la ITV, es decir, baja velocidad, circulación en línea recta, sin transferencias de carga ni actuación de fuerzas exteriores. La variable principal de este modelo es el ángulo de convergencia, y su resultado se ve modificado por coeficientes que representan la presión de inflado, la fuerza vertical, y las características de cada binomio neumático - superficie de rodadura. Estos coeficientes han de determinarse mediante ensayos experimentales para cada combinación de factores.

A continuación, se presenta la expresión que relaciona los distintos factores con la fuerza lateral:

$$F_y = (\varphi \cdot F_z^2 + \vartheta \cdot F_z + \nu) + (\kappa \cdot P^2 + \lambda \cdot P + \sigma) \cdot \alpha \quad (6-3)$$

donde α es el ángulo de convergencia, F_z es la fuerza vertical, P es la presión de inflado de los neumáticos y φ , ϑ , ν , κ , λ y σ son los coeficientes experimentales, que han de determinarse mediante ensayos para cada combinación de vehículo, neumáticos y superficie de rodadura.

Se hará uso de este modelo como método alternativo para estimar la fuerza lateral a partir de la desviación lateral, en un criterio de inspección de la dirección de un vehículo en la ITV, basado en el deterioro de las cualidades dinámicas, de los propuestos en el Capítulo 7.

6.2 Relación entre las medidas con placa alineadora y con placa dinamométrica

La diferencia fundamental entre la fuerza lateral del neumático desarrollada en una placa alineadora y en una placa de medida dinamométrica rígida es que la primera tiene permitido el desplazamiento lateral impuesto por el neumático que rueda sobre ella, haciendo que el deslizamiento lateral entre neumático y placa sea reducido, ya que, como se ha visto, esta ejerce una fuerza de reacción limitada. Sin embargo, la segunda, al no poder desplazarse lateralmente, crea una situación de mayor esfuerzo para el neumático, que origina el deslizamiento entre neumático y

placa y hace que la fuerza lateral que tiene que ejercer el neumático para avanzar sea mayor, si bien esto permite obtener información sobre los distintos factores que determinan el deslizamiento.

Se ha podido comprobar también que la variabilidad que presenta la medida mediante placa dinamométrica es más reducida, para unas mismas condiciones de ensayo, que la de la placa alineadora. Por ejemplo, para una serie de 10 ensayos experimentales se ha obtenido un coeficiente de variación medio (cociente de la desviación estándar entre la media de la medida) de 0,24 en el caso de la placa alineadora y de 0,20 para la dinamométrica. De cara a la ITV, sin embargo, donde lo que se va a intentar determinar es si la alineación es correcta, es complicado que, siempre que se presente a la inspección, un vehículo mantenga las mismas condiciones, ya que el simple hecho de haber circulado con anterioridad a la medida sobre un pavimento mojado o sucio, hace que cambien significativamente los valores de fuerza lateral que es capaz de desarrollar sobre la placa dinamométrica. Por lo tanto, sería necesario realizar ensayos exhaustivos para cada vehículo, neumático y condiciones de contacto, de cara a comprobar la influencia de cada factor en la fuerza lateral, para poder estimar el ángulo de convergencia que ha provocado un determinado resultado en la placa dinamométrica.

En definitiva, ambas placas proporcionan aproximadamente la misma utilidad a la hora de verificar el estado de la alineación de un vehículo en la ITV: dado que no es posible realizar ensayos sistemáticos para comprobar la contribución de cada factor en la fuerza lateral medida mediante placa dinamométrica por cada vehículo presentado a la ITV, el margen de incertidumbre sobre el ángulo de convergencia que provoca una cierta fuerza lateral es similar al debido a la variabilidad en la determinación de la desviación lateral (y el consiguiente ángulo de convergencia) obtenida de la placa alineadora.

Sin embargo, otros factores como el menor valor de adquisición, o el hecho de que ya se encuentre instalada en todas las ITV, hacen que la placa alineadora sea el instrumento adecuado para verificar la alineación de los vehículos en la inspección técnica periódica.

Se ha llevado a cabo la comparación entre las medidas de fuerza lateral y de desviación lateral realizadas, respectivamente, con las placas dinamométrica y alineadora disponibles en el laboratorio, estudio que no se había llevado a cabo hasta la fecha en la bibliografía. Se puede visualizar la correlación entre ambas

magnitudes en la Figura 6.13, obtenida a partir de una muestra de ensayos realizados con 83 vehículos.

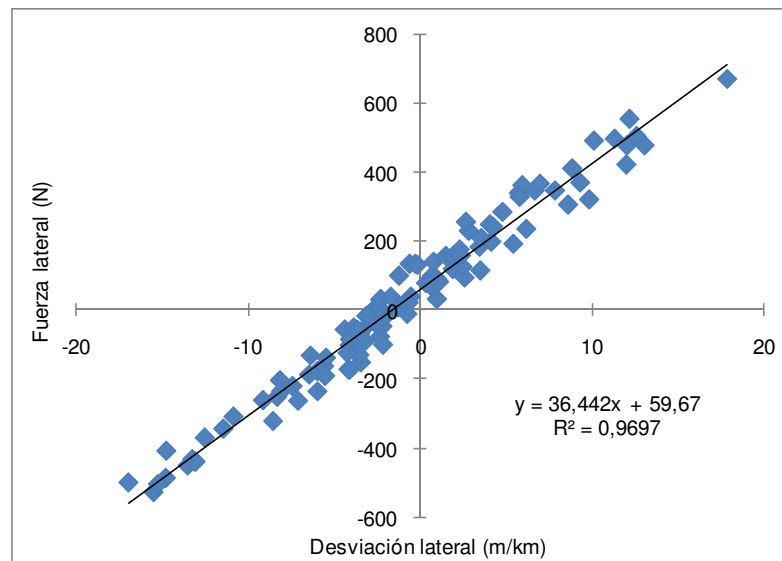


Figura 6.13 Fuerza lateral medida en placa dinamométrica, en función de desviación lateral medida en placa alineadora

Como se deriva de la figura, existe una relación lineal entre los dos tipos de medida, con un coeficiente de determinación R^2 de Pearson igual a 0,97, que se ajusta a la siguiente expresión:

$$F_y = 36,442 \cdot D_l + 59,67 \quad (6-4)$$

La ecuación anterior será utilizada en la Propuesta II de criterio de inspección, para estimar la fuerza lateral que se produciría en las condiciones de medida de la placa dinamométrica, a partir de la desviación lateral medida en la placa alineadora. Dicha relación es válida para el modelo concreto de placa dinamométrica que se ha utilizado en los ensayos, y las condiciones de contacto de suelo seco y banda de rodadura del neumático limpia. Otras placas contarán con superficies de contacto con distintos coeficientes de rozamiento, que darán lugar a distintas capacidades de generar fuerzas laterales. Normalmente no se dispone de los dos tipos de placa de medida en la misma instalación, como para poder realizar ambos tipos de medida sucesivamente y conocer así el nivel de fuerza lateral a esperar para cada ángulo de convergencia. De hecho, si se contara con una placa dinamométrica se realizaría la medida de fuerza lateral con la misma, como es lógico, y no sería necesario el presente desarrollo. Por ese motivo, y a partir de las diferencias observadas entre las medidas con la placa alineadora y la dinamométrica, se ha estudiado la posibilidad de relacionar la fuerza lateral que

ejercería el neumático en una determinada placa dinamométrica, con la que es posible obtener de cualquier placa alineadora. El interés por estimar la fuerza lateral producida en el contacto neumático suelo, de cara a establecer un nuevo procedimiento de inspección, se debe a que actualmente es para la placa dinamométrica para la única que existe un criterio claro de inspección, basado en unos límites concretos.

En la Figura 6.14 a) se presentan resultados experimentales de la comparación de ambas fuerzas para distintos ensayos con los neumáticos I, y en la Figura 6.14 b) con los neumáticos II. La fuerza correspondiente a la placa dinamométrica es la directamente extraída de la medida experimental, mientras que la del alineador se ha obtenido mediante la siguiente ecuación:

$$F_a = (d_l \cdot K_m) + F_{Roz} \quad (6-5)$$

donde d_l es el desplazamiento medido por la placa alineadora para ese mismo ensayo, K_m es la constante de rigidez del muelle de centrado, y F_{Roz} la fuerza de rozamiento entre bastidor móvil y fijo correspondiente a la placa utilizada.

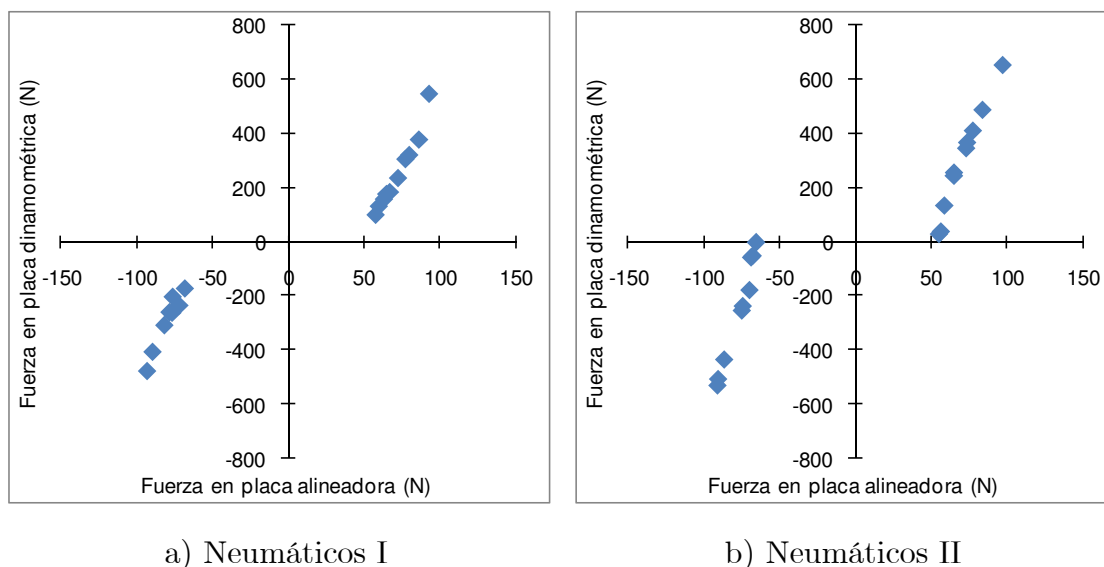


Figura 6.14 Relación entre fuerzas laterales en placa dinamométrica y alineadora. P= 2 bar

Para poder realizar esta comparación ha sido necesario obtener la curva característica de la placa alineadora, mostrada en la Figura 4.8 del apartado 4.1.3. Para ello se ha llevado a cabo la medición simultánea del desplazamiento de la placa alineadora y la fuerza necesaria para provocar ese desplazamiento, lo cual permite identificar el valor de la fuerza de rozamiento estático inicial y la constante elástica de los muelles de centrado.

Generalizando la relación encontrada entre estas dos fuerzas, se puede desarrollar una metodología para obtener una a partir de la otra, como alternativa al empleo de la Ecuación (6-4) para la aplicación de la Propuesta II de mejora del método de inspección del sistema de dirección de los automóviles en la ITV, dentro del Capítulo 7. Cabe señalar que hasta la fecha tampoco se había estudiado esta posibilidad en la bibliografía. En la Figura 6.15 se muestra un esquema de dicha relación, para el caso de convergencia positiva, que correspondería a la porción de la Figura 6.14 en la que ambas fuerzas son positivas (la relación sería análoga para ángulos negativos). Para un determinado desplazamiento lateral d_i de la placa alineadora, se registra una fuerza lateral en la placa alineadora (F_{a-i}), que consta de dos componentes: la fuerza de rozamiento inicial de la placa alineadora (F_{roz}) y la ejercida por el muelle ($F_{muelle}=K_m \cdot d_i$). En virtud del modelo desarrollado en el apartado 5.4.8, se puede calcular el ángulo de convergencia que origina ese desplazamiento lateral d concreto. A partir de ese ángulo de convergencia, y haciendo uso del modelo de contacto neumático-calzada mostrado en el apartado 6.1.3, se puede determinar la fuerza lateral F_{d-i} que mediría la placa dinamométrica para esas condiciones. De esta forma se puede convertir una medida de fuerza lateral registrada en las condiciones de la placa alineadora en la fuerza lateral que se mediría en las condiciones de la placa dinamométrica, lo cual, como ya se ha indicado, es importante dado que hasta ahora el único criterio objetivo de inspección de la alineación que se ha desarrollado está basado en la fuerza lateral. La pendiente a , que relaciona ambas magnitudes se encuentra vinculada con la rigidez lateral del neumático y el rozamiento con la superficie de rodadura de la placa dinamométrica. Mediante la siguiente ecuación, se puede encontrar el valor que resultaría de la medida de fuerza lateral con placa dinamométrica (F_{d-i}) para un ensayo en el que se haya medido un determinado desplazamiento lateral (d_i) en la placa alineadora:

$$F_{d-i} = (K_m \cdot d_i) \cdot a \quad (6-6)$$

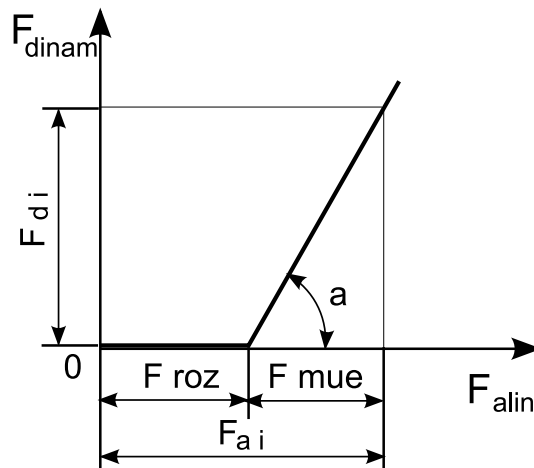


Figura 6.15 Relación entre las fuerzas medidas en placa dinamométrica y alineadora

Capítulo 7 Propuestas de mejora en la inspección del sistema de dirección

En los capítulos precedentes se han presentado distintos aspectos relacionados con la revisión del sistema de dirección de turismos en la ITV: se ha destacado la importancia de la normativa existente sobre el automóvil, en particular aquella que obliga a verificar que los vehículos en circulación mantienen unos parámetros y condiciones de seguridad análogos a los que poseen al salir de fábrica. Se han analizado las implicaciones de los distintos ajustes de la geometría de la dirección y sus consecuencias sobre la seguridad en la circulación. Se presentaron también las alternativas existentes en la actualidad para caracterizar el estado geométrico del sistema de dirección, profundizando en el análisis de los fundamentos de la medida de desviación lateral mediante el alineador al paso. Posteriormente, se determinaron experimentalmente los factores que influyen en la medida mediante dicho dispositivo, y su comparación con la placa dinamométrica. Cabe destacar el hecho de que se haya encontrado que la desviación lateral medida mediante placa alineadora no presenta una influencia significativa de otros factores aparte del ángulo de convergencia, lo que permite relacionar un ángulo de convergencia con una determinada desviación lateral, siempre teniendo en cuenta

la variabilidad propia del ensayo, con la incertidumbre que se ha indicado para el modelo propuesto en el apartado 5.4.8.

Todo el análisis previo realizado tiene el objeto de servir como base para la principal contribución de esta tesis, que se aborda en el presente capítulo: establecer mejoras en la metodología de inspección del sistema de dirección de los vehículos en la ITV, haciendo uso del dispositivo de inspección más extendido hoy en día, que es la placa alineadora. Las tres propuestas de criterio de inspección que se han desarrollado cumplen con las premisas que establece el Manual de Procedimiento de ITV (MITYC-ITV, 2009), que ya fueron expuestas en el apartado 2.1.3.2. Todas ellas persiguen un mismo objetivo: garantizar la aptitud del ajuste de alineación del sistema de dirección de los vehículos, pero para llegar a tal fin se basan en distintos parámetros. Al final de este capítulo, en el apartado 7.5, se realiza una comparativa, discutiendo la eficacia de cada uno de los criterios en determinar si el estado de la dirección es defectuoso, así como la idoneidad para sustituir el actual criterio de inspección en la ITV. A partir de dicha comparativa, se propondrá finalmente una de las alternativas como principal contribución de esta Tesis.

Antes de pasar a exponer los tres criterios desarrollados, se van a analizar las recomendaciones actualmente existentes en relación a la verificación de la alineación durante la ITV.

7.1 Criterios existentes

Dentro de sus recomendaciones, la CEPE/ONU emitió en 1998 la Resolución Consolidada sobre Tráfico por Carretera (CEPE/ONU, 1998b), en la que se aconseja la revisión de la alineación de las ruedas directrices mediante un instrumento que compruebe que las mismas están alineadas convenientemente (Tabla 7-1).

Estas indicaciones coinciden con las dadas por el “*Comité International de l'Inspection Technique Automobile*”, C.I.T.A., en su Recomendación nº1 (C.I.T.A., 1996), recogidas en la Tabla 7-2. El C.I.T.A. es la asociación de las organizaciones autorizadas a llevar a cabo la ITV en el mundo. Debido a su dilatada experiencia, figura como la entidad de mayor prestigio reconocido a nivel mundial y, por lo

tanto, es un órgano de consulta de los distintos países y organizaciones internacionales (UE, CEPE/ONU, OCDE, etc.) en la materia de ITV.

Tabla 7-1 Extracto de la recomendación (CEPE/ONU, 1998b).

<i>ITEM</i>	<i>METHOD OF INSPECTION</i>	<i>PRINCIPAL REASONS FOR REJECTION</i>
<i>2.4. WHEEL ALIGNMENT</i>		
<i>2.4.1. Alignment of driving wheels</i>	<i>Check with a wheel alignment tester (e.g. a slip gauge) that the driving wheels are properly aligned in accordance with the data provided by the manufacturer of the vehicle.</i>	<i>(i) Alignment of the driving wheels not in accordance with the vehicle manufacturer's instructions.</i>

Tabla 7-2 Extracto de la recomendación (C.I.T.A., 1996).

<i>2.4. WHEEL ALIGNMENT</i>		
<i>2.4.1. Steered wheels setting</i>	<i>Check with a wheel alignment tester (e.g. a slip gauge) that the steered wheels are properly aligned in accordance with the data provided by the manufacturer of the particular vehicle being examined.</i>	<i>(i) The setting of the alignment of the steered wheels is not in accordance with the vehicle manufacturer's instructions.</i>

En ambas recomendaciones se menciona expresamente el alineador al paso (“*slip gauge*”) como instrumento adecuado para efectuar la comprobación de la alineación de las ruedas directrices. Se indica también que el resultado de la medida se debería comparar con el que el fabricante establece para cada vehículo en concreto. A este respecto, cabe señalar que los fabricantes de vehículos no proporcionan actualmente ninguna indicación acerca del valor de desviación lateral medido mediante placa alineadora que consideran adecuado para cada uno de sus modelos. Por lo tanto, esta recomendación adolece de cierto carácter paradójico, resultando difícilmente aplicable tal y como está establecida. Sin embargo, el dato sobre alineación que sí establecen todos los fabricantes es, al menos, un ángulo de convergencia recomendado, junto con su respectivo rango de tolerancia, ya que su ajuste constituye una operación de mantenimiento habitual de los vehículos. En

consecuencia, un criterio de inspección basado en estas recomendaciones internacionales debería ser capaz de medir con una cierta precisión el ángulo de convergencia del vehículo en cuestión, y conocer el ángulo y tolerancia recomendado para cada número de bastidor. Más adelante se discutirá si hoy en día es o no factible llevar a la práctica un criterio de estas características.

En España, como ya se ha indicado en la Introducción, no existe por el momento un criterio claro de aceptación o rechazo de vehículos en la ITV en base exclusivamente a la medición de la desviación lateral (o desviación de ruedas). Esta medición, sin embargo, sí que constituye un apartado específico del Manual de Procedimiento de Inspección (MITYC-ITV, 2009). En concreto, se enmarca dentro del Capítulo 7 (Dirección), como apartado 7.1 (Desviación de ruedas). En él, se indica lo siguiente:

a.- ESPECIFICACIONES GENERALES

Todo vehículo a motor debe estar provisto de un mecanismo adecuado que permita al conductor mantener la dirección del vehículo y modificarla con facilidad, rapidez y seguridad.

b.- MÉTODO

Para realizar esta inspección se utilizará un alineador al paso o dispositivo adecuado.

El vehículo deberá pasar perfectamente alineado por la placa, circulando a marcha lenta y se comprobará la desalineación de las ruedas del eje o de los ejes directrices.

Esta inspección deberá ser complementada con una inspección visual en foso o elevador, comprobándose desgastes irregulares en los neumáticos y el estado general de los órganos de dirección.

Al utilizarse el alineador al paso deberá tenerse en cuenta que una incorrecta presión de los neumáticos puede dar lugar a lecturas erróneas.

c.- REGLAMENTACIÓN APLICABLE

General: Reglamento General de Vehículos, Art. 11.5.

Particular: Ninguna.

d.- INTERPRETACIÓN DE DEFECTOS

1.- El vehículo presenta desalineación superior a 10 m/km en alguno de sus ejes directrices y se aprecia defecto de estado en la inspección en foso

<i>Calificación</i>		
<i>Defecto Leve</i>	<i>Defecto Grave</i>	<i>Defecto Muy Grave</i>
	<i>X</i>	

A la vista del Manual, se pueden extraer las siguientes conclusiones acerca del actual método de inspección:

- La placa alineadora “o dispositivo adecuado” es el equipo indicado para efectuar la comprobación de la desviación de ruedas. Está incluido, además, dentro de la lista de equipos que necesariamente deben disponer en las ITV, que, si bien es competencia de las distintas Comunidades Autónomas, todas ellas lo establecen como requisito (por ejemplo, en Canarias (Gobierno de Canarias, 2007)).
- En España se cita el mismo valor de desviación lateral para todos los vehículos (10 m/km), independientemente del ángulo de convergencia recomendado por el fabricante para cada modelo en concreto.
- Aunque la medida objetiva del instrumento supere los 10 m/km, no se anotará defecto si, a criterio del inspector, no se aprecia ningún elemento anormal en la inspección visual en foso (como el desgaste característico debido a una incorrecta convergencia). Por lo tanto, si un vehículo presenta una alineación claramente desajustada, con una desviación lateral de incluso 20 m/km, pero tiene recién montados unos neumáticos nuevos (sin desgaste en absoluto), y todas las articulaciones y demás elementos del sistema de dirección presentan buen estado, no se puede anotar un defecto en este apartado, ya que visualmente no es posible determinar ángulos de tan pequeña magnitud.
- No se establece una graduación de la gravedad de la desviación. Únicamente se puede considerar el defecto en este apartado como grave; es decir, que el vehículo tendrá que ser presentado de nuevo a inspección tras haber corregido la causa que provoque el defecto. Sin embargo, es frecuente que pequeños desajustes de la convergencia originen ligeros desgastes irregulares de los neumáticos, en cuyo caso la actual redacción del Manual impide que se pueda comunicar al propietario del vehículo de modo formal (mediante la anotación de

un Defecto Leve) la conveniencia de revisar la alineación, sin que ello implique necesariamente una posterior nueva visita a la estación.

En el caso de que se modificara la actual redacción del Manual de Procedimiento, y dejara de ser necesaria la apreciación visual de un defecto de estado por parte del inspector para poder calificar con defecto este apartado del Manual, todas las inspecciones cuya medida de desviación lateral mediante el alineador al paso fuese superior a ± 10 m/km serían constitutivas de Defecto Grave. Se ha comprobado el efecto que tendría esta modificación sobre el número de vehículos rechazados en la inspección, mediante los mismos ensayos de validación que se han realizado para los tres criterios propuestos en el presente capítulo. Se ha contado con 83 vehículos distintos para un total de 93 ensayos, cuyas características serán presentadas en el apartado 7.2.2. En la Tabla 7-3 se muestran los resultados de la aplicación del límite de ± 10 m/km. Como se puede observar en la misma, un 12% de los ensayos resultarían en la calificación de Defecto Grave.

Tabla 7-3 Resultado de aplicación de un límite de ± 10 m/km

	Nº de ensayos
Vehículo sin defecto	82 (88%)
Defecto leve	No definido
Defecto grave	11 (12%)
Total de ensayos	93 (100%)

Se ha revisado también la normativa vigente en otros países de nuestro entorno, observando que resulta similar a la española. Sirva como ejemplo el caso de Francia: sus disposiciones al efecto, contenidas en el “*Arrêté Ministériel du 18 juin 1991: Réglementation du Contrôle Technique Périodique des Véhicules Légers*” y en la “*Instruction Technique SR/V/F2-1-C*”, sobre la inspección de la función de dirección en la ITV, establecen que durante la ITV se debe comprobar la desviación lateral, y que los centros encargados de realizar la ITV deben disponer de placa alineadora. En el caso de que la desviación lateral sea “excesiva” se debe calificar como Defecto Leve.

Por otro lado, previamente al desarrollo de un criterio de inspección del sistema de dirección en la ITV, se debe plantear qué es lo que se pretende evaluar mediante el mismo. En general no resulta inmediato establecer cuándo la

alineación de un vehículo es correcta o no. En principio, como ya se ha indicado, la más adecuada para cada vehículo será aquella establecida por el fabricante del mismo, y que es la que le ha permitido superar los ensayos de homologación de vehículo completo, proporcionándole las mejores cualidades dinámicas de estabilidad y adherencia. Normalmente, el fabricante habrá realizado pruebas del vehículo con distintos ajustes de la alineación, para comprobar cuál es el que ofrece un mejor conjunto de cualidades al mismo. Por este motivo, para evaluar la eficacia de las tres propuestas de mejora que se presentan en este capítulo, los resultados de calificación de defectos obtenidos de los tres criterios propuestos van a ser comparados con el criterio de referencia que resultaría de comprobar si el ángulo de convergencia de un vehículo, medido con precisión mediante un medidor de ángulos, se encuentra dentro de las especificaciones del fabricante, ya que, a día de hoy, este es el criterio más apropiado que existe. Sin embargo, cabe destacar que los fabricantes no establecen una graduación de la gravedad del desajuste de la alineación. Como se ha considerado fundamental que se pueda distinguir entre Defecto Leve y grave a la hora de comunicar el resultado de la inspección al propietario del vehículo, se ha establecido como límite para Defecto Grave el valor a partir del cual se perciben ya claramente los defectos de alineación (un 50% adicional a la tolerancia), según la experiencia adquirida. Entre el valor de la tolerancia del fabricante y el límite para Defecto Grave, se calificaría la inspección con Defecto Leve, según este criterio que se ha diseñado como referencia expresamente para esta tesis.

Es interesante señalar en este punto que, incluso para una de las entidades con más experiencia sobre neumáticos, Michelin, la alineación perfecta no existe (Descamps, 2003). En su opinión, un turismo que mantiene la trayectoria recta, no presenta reacciones anormales en curvas y no desgasta anormalmente sus neumáticos, está perfectamente ajustado, aunque la medición exacta de ángulos indique que no se encuentra dentro de los valores marcados por el fabricante del mismo. En este sentido, se ha procurado que cada uno de los tres criterios propuestos sea lo suficientemente tolerante como para que aquellos vehículos que circulan normalmente, sin presentar en la práctica ningún efecto negativo claramente debido a la alineación, no sean calificados con Defecto Grave (aunque quizás en teoría se encuentren fuera de las tolerancias del fabricante). Por lo tanto, se ha buscado que los criterios propuestos sean realistas y, en todo caso, no más severos en la calificación de defectos que el criterio que se va a usar de referencia

para compararlos (el ángulo de convergencia recomendado por el fabricante). Además de asegurar que no se va a calificar con un defecto (por lo menos, con un Defecto Grave) un vehículo que según su fabricante se encuentra dentro de tolerancias, de cara a la aplicación en las ITV del criterio propuesto tampoco sería razonable que se comenzara a rechazar en razón de su alineación a un número elevado de vehículos que hasta ahora pasaban la ITV sin problemas.

Por último, al margen de los ángulos de alineación en sí, se ha visto en anteriores capítulos que existen dos medidas indirectas de la alineación: la adherencia lateral y la desviación lateral, que juegan un papel importante en la dinámica lateral del vehículo y, en consecuencia, pueden ser usadas como indicadores del estado de la dirección. Por lo tanto, teóricamente se podrían plantear varias vías para determinar si una alineación es o no adecuada para la circulación, con sus respectivos criterios.

En los siguientes apartados se van a desarrollar tres metodologías, haciendo uso todas ellas de la placa alineadora, las cuales se consideran a priori perfectamente indicadas al efecto de verificar el estado de la alineación en la ITV de una forma objetiva, lo que supondría una mejora sobre el criterio de inspección actualmente vigente en España. La primera de ellas está basada en la estimación del ángulo de convergencia a partir de la medida de desviación lateral mediante placa alineadora, y su posterior comparación con unos límites basados en las recomendaciones del fabricante para cada vehículo en particular. La segunda propuesta se basa en la estimación, también a partir de la medida de desviación lateral en placa alineadora, de la adherencia lateral detraída por una incorrecta alineación. Y el tercero de los criterios propuestos consiste en unos límites de desviación lateral generales para todos los vehículos, a partir del análisis del rango en que se mueven los ángulos de convergencia recomendados para los vehículos actualmente en circulación.

7.2 Propuesta I: Criterio basado en el ángulo de convergencia recomendado por el fabricante

En base a las recomendaciones internacionales formuladas por C.I.T.A. y CEPE/ONU, presentadas anteriormente, se debería diagnosticar el estado del

sistema de dirección de los vehículos en relación a las especificaciones de alineación fijadas por los fabricantes para cada modelo de vehículo en particular.

Para ello, idealmente habría que medir directamente el ángulo de convergencia con precisión. No obstante, dado que, según el Manual de Procedimiento, las operaciones a realizar durante la ITV deben tener una duración limitada, la única alternativa técnicamente viable en la actualidad sería un medidor de ángulos 3D, del tipo N.C.A. (*“Non-Contact Alignment machines”*), como los mencionados en el apartado 2.4.2, que se utilizan al final de las líneas de montaje de automóviles. Sin embargo, esta alternativa no sería económicamente viable para las ITV, dado el alto coste de adquisición que hoy en día tienen estos dispositivos. En el caso de que su precio se redujera, se podría estudiar su adquisición por las ITV; quizás no una máquina por línea de inspección, sino solo una o dos por estación, a la que convergieran todas las líneas. Hasta el momento en que dicho abaratamiento se produzca, o aparezca otra tecnología de medición de la alineación de similares características, se puede plantear como alternativa el empleo de otro instrumento que ofrezca una indicación aproximada del ángulo de convergencia.

Como se ha indicado en anteriores capítulos, se ha comprobado que la placa alineadora ofrece una estimación del ángulo de convergencia total por eje dentro de unos márgenes de error de la desviación lateral de en torno a ± 3 m/km, que equivalen a unos $0,36^\circ$ del ángulo de convergencia, según el modelo propuesto por la Ecuación (5-11). Dado que estas placas se encuentran ya instaladas en todas las ITV, mediante esta tesis se propone comenzar a utilizarlas en un primer momento de la aplicación del criterio que se va a desarrollar a continuación, aunque su utilidad sería claramente inferior a la alcanzable con un medidor del tipo N.C.A.

7.2.1 Planteamiento del límite de rechazo

Al margen del instrumento de medida empleado, para aplicar un criterio basado en el ángulo de convergencia recomendado habría que obtener la diferencia del ángulo de convergencia medido con el recomendado por el fabricante para el vehículo inspeccionado, y establecer un intervalo de tolerancia, a partir del cual se pudiera afirmar que la alineación no se encuentra dentro de su rango óptimo (en cuanto a seguridad, consumo de combustible, desgaste de neumáticos, etc.). De esta manera, se garantizaría que el vehículo reúne las condiciones que le

permitieron superar los ensayos de homologación, y que se supone que son las más adecuadas para él.

Como es lógico, habría que contar en cada ITV con los datos de alineación específicos de los vehículos que pudieran pasar el control. En la actualidad se cuenta con bases de datos como las integradas en los medidores de ángulos convencionales, en las que el usuario debe buscar el modelo y variante del vehículo medido, pero esta opción no resulta aceptable para la ITV, dado el tiempo que necesitaría el inspector para llevar a cabo la búsqueda en la base de datos, y la posibilidad de cometer un error en la selección del vehículo. La única opción operativa sería que los datos específicos correspondientes al vehículo inspeccionado se obtuviesen automáticamente. En este sentido, cabe destacar que, de cara a la revisión de los actuales métodos de inspección, y sobre todo debido a la inclusión de los sistemas electrónicos, los fabricantes o importadores de vehículos van a tener que proporcionar a las ITV datos concretos de los sistemas embarcados en cada número de bastidor, por lo que sería un momento adecuado para solicitarles también los ángulos de alineación que le corresponden. Otra posibilidad sería que el ángulo de convergencia recomendado, dado que constituye un valor importante dentro de las especificaciones técnicas del vehículo, constituyera en el futuro uno de los campos del Certificado de Conformidad de cada unidad (CoC), al que debieran tener acceso todas las ITV.

En cuanto a la máxima diferencia que se podría admitir entre el ángulo de convergencia medido y el valor recomendado por el fabricante para cada modelo, se pueden plantear en principio dos posibilidades:

- Adoptar directamente la tolerancia que indica el fabricante para cada modelo en concreto y que, por lo tanto, debería figurar en la base de datos nacional informatizada o en el propio CoC.
- Establecer un margen común para todos los modelos. Habría que tener en cuenta que la tolerancia indicada por los fabricantes suele estar en torno a $\pm 0,2^\circ$, pero que en algún caso llega hasta $\pm 0,45^\circ$ como máximo y a $\pm 0,07^\circ$ como mínimo (como se ve en el apartado 7.4.1). Por lo tanto, si se optara por establecer un margen igual para todos los vehículos, en lugar del establecido por el fabricante para cada modelo, un valor razonable sería $\pm 0,5^\circ$, ya que permite un pequeño margen adicional sobre el máximo encontrado.

En el caso de decantarse por la segunda posibilidad, se aseguraría que ningún vehículo dentro del rango permitido por el fabricante fuese rechazado en la ITV, pero se estarían dejando de detectar multitud de defectos en vehículos con tolerancias recomendadas más estrechas. Por otro lado, la primera posibilidad sería de más compleja aplicación, aunque en teoría más adecuada, ya que al respetar el margen de tolerancia establecido por el fabricante, se tiene en cuenta que unos vehículos presentan más flexibilidad entre los elementos de su sistema de dirección que otros. Sin embargo, el hecho de que para algunos vehículos la tolerancia sea tan pequeña como $\pm 0,07^\circ$, daría lugar en los mismos a recibir la calificación de defectos con una elevada frecuencia, debido a que ese margen representa prácticamente la variabilidad en la medida de convergencia incluso con los medidores de ángulos más precisos. Por lo tanto, lo más recomendable sería una solución intermedia: aplicar en principio la tolerancia marcada por el fabricante, pero estableciendo un mínimo para la misma, que se podría situar en unos $0,15^\circ$. Esta solución intermedia es la que se ha elegido para el criterio que se propone en este apartado.

Una vez determinado el ángulo de convergencia que debería poseer un vehículo, y la tolerancia alrededor del mismo que es permisible, queda por establecer el criterio de calificación de la gravedad de los posibles defectos. El criterio que se propone a continuación se ha establecido para su aplicación concreta mediante la placa alineadora como dispositivo de medida, teniendo en cuenta por tanto la precisión en la estimación del ángulo de convergencia total por eje que le es inherente. Además, para la determinación de los límites que se proponen para la calificación de defecto se ha partido de la experiencia adquirida acerca de la cuantía del desajuste del ángulo de convergencia que produce claros efectos negativos sobre el comportamiento del vehículo.

En primer lugar, se ha establecido que para un rango de convergencia correspondiente a 1,5 veces la tolerancia recomendada por el fabricante, alrededor del ángulo recomendado, no se calificaría con defecto el estado de la alineación. Como se ha indicado anteriormente, se establece un mínimo de $0,15^\circ$ de tolerancia, en caso de que la recomendada por el fabricante sea menor. Se consideraría Defecto Leve aquel que supere el rango definido anteriormente, y hasta un valor alejado de la convergencia recomendada en una magnitud de 2,5 veces la tolerancia establecida. Para aquellas medidas que rebasen en más de 2,5 veces la tolerancia establecida, se consideraría que la alineación presenta un Defecto Grave, por lo que

sería necesario ajustarla y pasar de nuevo la inspección. En la Figura 7.1 se presenta el esquema de un ejemplo de límites para un valor de convergencia recomendada positiva. En el mismo se indican los rangos para considerar un Defecto Leve (D.L.) o Grave (D.G.).

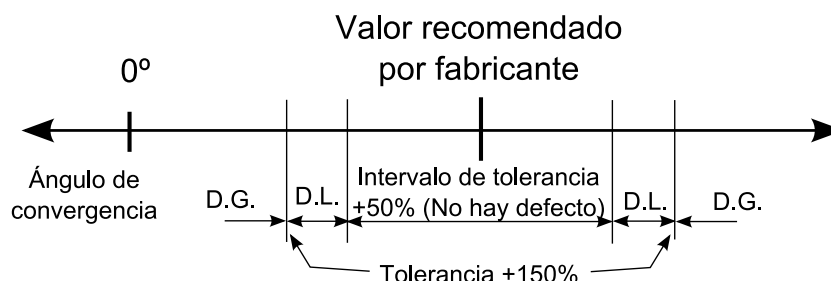


Figura 7.1 Criterio I de calificación de defectos

Al igual que se hará para los otros dos criterios que se presentarán posteriormente, se considera necesario establecer la posibilidad de que aquellos vehículos diagnosticados con Defecto Grave puedan repetir la medida al menos un par de ocasiones más, para descartar un posible resultado anómalo, de modo similar a como se hace en otros apartados del Manual, como el ensayo de emisiones. De las tres repeticiones, se retendría como resultado de la inspección la más favorable. La principal razón para establecer esta posibilidad es la conocida variabilidad de la medida con placa alineadora. Cabe destacar que en los ensayos de validación que se presentan en el siguiente apartado se han realizado sistemáticamente varias repeticiones de la medida para un mismo ensayo (obteniendo como resultado final la media de las mismas), y no únicamente para los ensayos con resultado de calificación de defecto.

Otro aspecto a destacar es que, a pesar de que en el planteamiento de los límites para la calificación de defectos ya se han establecido unos márgenes adicionales a la tolerancia del ángulo de convergencia, la aplicación del presente criterio en la ITV supondría un mayor número de vehículos rechazados por causa de la alineación que los que se dan en la actualidad. Esto es así dado que la inspección, tal y como se realiza actualmente, no dispone de un criterio objetivo que califique a los vehículos de forma automática en función de un parámetro medido, sino que la última palabra la tiene siempre el inspector y, como es sabido, visualmente es muy difícil determinar si los ángulos de la dirección son correctos o no, por lo que no es habitual que se anote un defecto en este apartado. Por lo tanto, de cara a una posible adaptación de este criterio por el Manual de Procedimiento de ITV, sería recomendable establecer inicialmente unos márgenes

más amplios para la calificación de defectos, para ir aumentando progresivamente el nivel de exigencia, aproximándolos a la estricta tolerancia del fabricante. De este modo se intenta evitar una posible falta de comprensión por parte de los usuarios de la ITV del repentino aumento del número de rechazos en la inspección, dando tiempo a que los propietarios de los vehículos se vayan concienciando, y así ir mejorando progresivamente el estado de la alineación de los vehículos.

En definitiva, el criterio así definido cumpliría estrictamente con las recomendaciones internacionales al respecto, pues hace uso de la placa alineadora y se basa en los ángulos establecidos por el fabricante para cada modelo de vehículo en concreto.

7.2.2 Ensayos de validación

Se han llevado a cabo ensayos para comprobar la eficacia de la presente propuesta de criterio de inspección en la detección de una alineación inadecuada. Estos mismos ensayos se van a utilizar también para validar la eficacia de las otras dos metodologías de inspección propuestas en el presente capítulo, ya que se han recogido los datos necesarios para la aplicación de todas ellas, permitiendo así la comparación de la eficacia de los tres métodos propuestos, que se hará en el apartado 7.5. Se ha seguido una metodología de ensayos similar a la descrita en el apartado 5.3, utilizando la instrumentación descrita en el apartado 5.1. En cada uno de los ensayos se ha medido con exactitud el ángulo de convergencia mediante un medidor de ángulos convencional, y se han registrado tanto la desviación lateral medida con la placa alineadora como la fuerza lateral y vertical medidas con la placa dinamométrica. Se efectuaron diez repeticiones de cada ensayo, para permitir detectar valores atípicos, y obtener así un valor más fiable de la media.

El número de vehículos distintos inspeccionados ha sido de 83, en las mismas condiciones en que se presentarían a la ITV, y con el ángulo de convergencia que tuvieran ajustado en ese momento. Asimismo, para alguno de ellos se ha procedido al ensayo con distintos ajustes del ángulo de convergencia, para ampliar así el alcance del estudio. En total, se cuenta con 93 ensayos representativos para comprobar la eficacia de los criterios de inspección propuestos. Para una mayor claridad, las tablas completas con los datos experimentales obtenidos de los ensayos de validación de cada uno de los criterios propuestos se han situado en el Anexo II, ofreciendo en este capítulo un resumen del conjunto de

datos, así como una muestra de diez ensayos para explicar el proceso seguido en su tratamiento.

Para el caso concreto de la validación de esta primera propuesta de criterio de inspección, se ha estimado el ángulo de convergencia a partir de la medición de desviación lateral mediante placa alineadora, utilizando para ello la Ecuación (5-11). Este ángulo se compara con el recomendado, y en función de la diferencia en relación a la tolerancia establecida para cada vehículo, se obtiene el dictamen de la inspección. En la Tabla 7-4 se muestra el ejemplo de los resultados de dicha validación para una muestra de vehículos. El conjunto de datos de los ensayos se encuentra en la Tabla A-1 del Anexo II. Tanto en la porción de tabla de muestra como en la completa, en la segunda columna se presenta el valor del ángulo de convergencia (α) medido mediante un medidor de ángulos convencional. A continuación de este, se muestran la desviación lateral medida con el alineador al paso, el ángulo de convergencia estimado y el ángulo recomendado por el fabricante junto con su tolerancia. En la penúltima columna se recoge el resultado de aplicar el presente Criterio I al ángulo de convergencia estimado, y en la última, el criterio del fabricante, que se ha tomado como referencia según lo expuesto en el apartado 7.1, aplicándolo al ángulo medido mediante un medidor exacto de ángulos.

Tabla 7-4 Muestra de ensayos de validación de la Propuesta I de criterio de inspección

Ensayo	α medido (°)	Desviación lateral (m/km)	α estimado (°)	α recomend. (°)	Tolerancia recomend. (°)	Dictamen según α estimado	Dictamen según α medido (Referencia)
55	0,60	6,44	0,63	-0,17	0,17	D.G.	D.G.
56	0,08	-0,28	0,10	0,00	0,17	OK	OK
57	0,49	2,26	0,30	0,30	0,17	OK	D.L.
58	-0,50	-8,58	-0,57	-0,23	0,17	D.L.	D.G.
59	-1,00	-14,82	-1,07	-0,23	0,17	D.G.	D.G.
60	0,03	0,37	0,15	0,00	0,17	OK	OK
61	0,13	0,52	0,16	-0,17	0,17	D.L.	D.G.
62	0,07	-0,17	0,11	0,00	0,15	OK	OK
63	-0,27	-5,52	-0,32	-0,23	0,17	OK	OK
64	-0,30	-8,11	-0,53	0,22	0,30	D.L.	D.G.

Como se puede observar en la Tabla 7-4, los resultados de la aplicación de este Criterio I a partir del ángulo de convergencia estimado mediante la desviación lateral no difieren significativamente, vehículo a vehículo, de la estricta aplicación

de los valores recomendados por el fabricante a partir de la medición exacta del ángulo mediante un medidor de ángulos convencional. Por lo general, el resultado de la aplicación del Criterio I es el mismo o menos severo (es decir, que califica al vehículo sin defecto o con un defecto menos grave) que el criterio de referencia del fabricante. En concreto, para el conjunto de los datos, se produce el mismo dictamen en un 63% de las inspecciones, y menos severo en otro 33% de ensayos. Las discrepancias más importantes en todo caso se producirían al diagnosticar con Defecto Grave (es decir, que necesita regresar a la ITV tras corregir el motivo que la origina) aquellos vehículos cuyo ángulo medido con el medidor de ángulos convencional se encuentra dentro de las especificaciones del fabricante, o en el rango de Defecto Leve. Este error, como se puede observar en la Tabla A-1 del Anexo II, no se llega a dar en ninguna ocasión. Únicamente en un 3% de las ocasiones, el criterio propuesto arroja un dictamen más severo que el estricto del fabricante, pero este consiste únicamente en calificar con Defecto Leve a vehículos cuyo ángulo de convergencia medido exactamente se encuentra dentro del rango recomendado por el fabricante, lo cual no implica la necesidad de volver a visitar la ITV tras modificar la alineación. Cabe destacar que, no obstante, estas discrepancias se producen por diferencias entre el ángulo medido y estimado menores que la propia precisión del modelo representado por la Ecuación (5-11), siendo lo suficientemente pequeñas como para que se pudieran dar también al medir en dos momentos distintos el mismo vehículo mediante el medidor convencional.

En la Tabla 7-5 se presenta un resumen del conjunto de ensayos de validación. En cifras globales, se observa que la presente Propuesta I califica un menor número de defectos que el criterio Referencia del fabricante (59% de vehículos sin defecto frente a 44% de la estricta aplicación de los valores recomendados por el fabricante), y la gravedad de estos también es menor (22% de defectos graves frente a 46%).

En el apartado 7.5 se analizarán otros aspectos sobre la posible adopción de este criterio en la ITV, y se comparará con las otras dos propuestas de criterio que se formulan a continuación.

Tabla 7-5 Resumen conjunto ensayos Criterio I

Resultado aplicación	Propuesta I de Criterio ITV	Criterio fabricante (Referencia)
Vehículo sin defecto	55 (59%)	41 (44%)
Defecto leve	18 (19%)	9 (10%)
Defecto grave	20 (22%)	43 (46%)
Total	93 (100%)	93 (100%)

7.3 Propuesta II: Criterio basado en la adherencia detráida por el ángulo de convergencia

Como ya se ha indicado en el Capítulo 5, los ensayos experimentales para evaluar la influencia de los distintos factores sobre la relación entre convergencia y desviación lateral realizados para esta tesis se llevaron a cabo simultáneamente con los conductores a la tesis de García-Pozuelo (García-Pozuelo, 2008). En dicha tesis, basada en la medida de fuerza mediante placa dinamométrica, se propone un criterio de inspección que establece unas cualidades mínimas exigibles a la dirección de un vehículo, cuantificables con independencia del modelo del mismo. Dicho criterio tiene como objeto garantizar un valor mínimo de adherencia disponible entre neumático y suelo, tras detraer la adherencia consumida por una alineación incorrecta.

Si un vehículo circula permanentemente con un ángulo de convergencia distinto de cero, estará ejerciendo de manera continua una fuerza lateral de un lado del eje contra el otro, incluso al circular en línea recta. Esta fuerza permanente disminuirá su capacidad para desarrollar mayores fuerzas laterales, y fuerzas longitudinales (según el concepto de “elipse de adherencia”, explicado en el apartado 2.3.2), necesarias para dirigir el vehículo. Este criterio trata, por tanto, no ya de medir el ángulo de convergencia en sí, sino que se basa en los resultados de un conjunto de factores que influyen en la producción de fuerza lateral por el neumático, en cuanto al deterioro de las cualidades dinámicas del vehículo, persiguiendo que un inadecuado ajuste de la alineación no impida realizar una maniobra de emergencia muy exigente en lo que respecta a solicitudes longitudinales o transversales del neumático.

A continuación, se propone un desarrollo de dicho criterio haciendo uso de la placa alineadora como instrumento de medida, y calculando la fuerza lateral ejercida por los neumáticos sobre el suelo a partir del valor de desviación lateral.

7.3.1 Planteamiento del límite de rechazo

Según el criterio planteado por García-Pozuelo, se denomina “adherencia lateral solicitada” (μ_y) al cociente entre las fuerzas lateral y vertical transmitidas por el neumático al suelo. Dicho criterio se concreta efectuando la medida de ambas fuerzas mediante una placa dinamométrica, en las mismas condiciones de medida que mediante la placa alineadora (es decir, para un vehículo circulando en línea recta, a baja velocidad, etc.). El criterio establece que si la adherencia lateral solicitada resulta superior a 0,15, se considera que el vehículo presenta un Defecto Grave en la ITV, y si se sitúa entre 0,11 y 0,15, leve. En la Figura 7.2 se muestra el resultado de aplicar los límites propuestos por García-Pozuelo para un vehículo ajustado a distintos ángulos de convergencia, en el que aquellos puntos situados fuera de los rectángulos sombreados oscuro y claro, los cuales representan los límites de la adherencia lateral μ_y , presentan Defecto Leve y Grave respectivamente.

Para la aplicación de este criterio, por una parte se necesita conocer la fuerza vertical que recibe la rueda sobre la que se mide también la lateral. En caso de no disponer de placa dinamométrica, este requisito se puede cumplir actualmente en las líneas de las estaciones ITV utilizando, o bien el medidor de fuerza vertical del frenómetro, o bien el del comprobador de la suspensión (ambos elementos presentes en las ITV). Otra posibilidad sería utilizar una báscula, disponible en todas las estaciones ITV, si bien no suelen disponer de una por línea. Por otra parte, la medida de la fuerza lateral producida por el neumático se realizaría idealmente mediante el dispositivo más adecuado para tal efecto, que es la placa dinamométrica. Sin embargo, en la actualidad no existen modelos de este tipo de instrumento diseñados específicamente para su uso en las ITV. Los modelos encontrados no presentan características adecuadas de robustez o durabilidad (están enfocados a biomecánica), y además hoy en día su elevado precio no los hace económicamente viables para su adquisición por las ITV. Por este motivo, se plantea como contribución de esta tesis hacer uso del alineador al paso como instrumento de medida de fuerza lateral, de la manera que se indica a continuación.

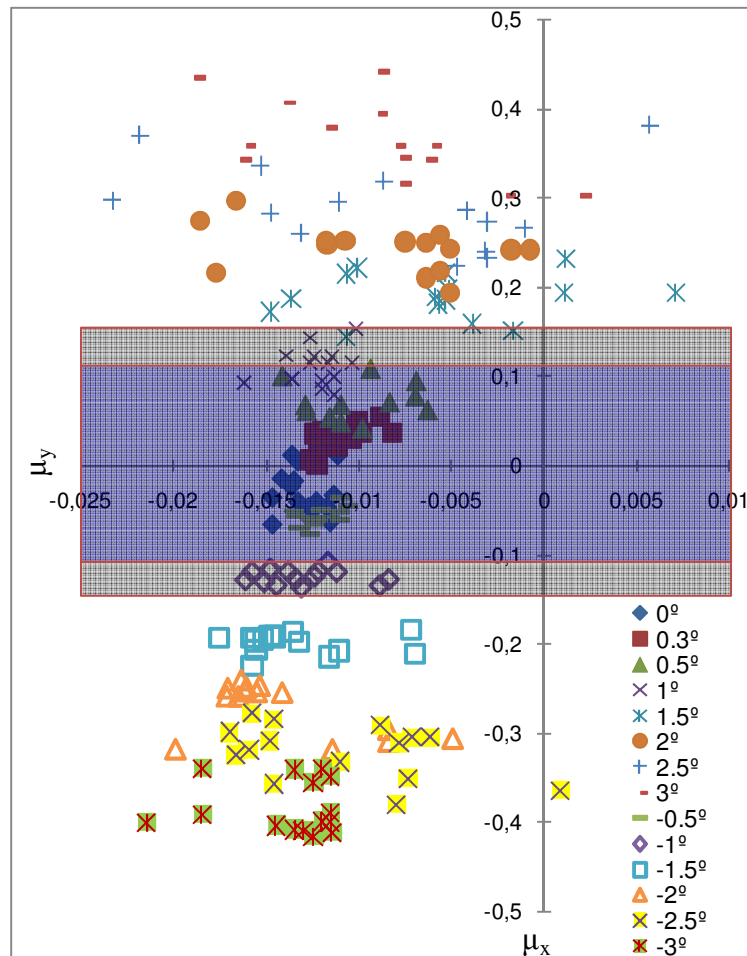


Figura 7.2 Criterio de inspección basado en adherencia (García-Pozuelo, Díaz & Boada, 2010)

Como se vio en el apartado 6.2, es posible relacionar la fuerza lateral que produce un neumático registrada por una placa dinamométrica con la desviación lateral medida en la placa alineadora. Por lo tanto, el procedimiento que se propone es el siguiente:

1. El vehículo debe circular sobre la placa alineadora, de la misma manera que ahora se realiza el ensayo.
2. A partir del resultado de la medida de desplazamiento lateral de la placa, se calcula el valor de la desviación lateral en m/km, mediante la Ecuación (4-3).
3. Haciendo uso de la Ecuación (6-4) se estima la fuerza lateral correspondiente a las condiciones de medida mediante placa dinamométrica.
4. Se divide la fuerza lateral obtenida por la fuerza vertical medida, consiguiendo como resultado la “adherencia lateral solicitada”.

5. Se compara la adherencia con los valores límite propuestos por García-Pozuelo para Defecto Leve y Grave (0,11 y 0,15, respectivamente).

En la Figura 7.3 se muestra un esquema resumen del procedimiento a seguir.

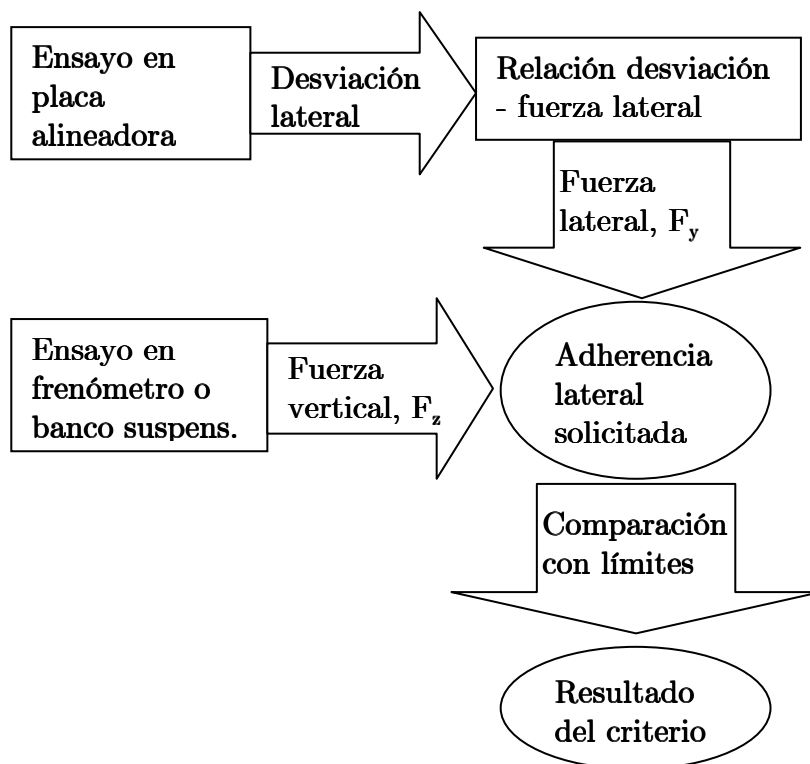


Figura 7.3 Esquema resumen del criterio basado en la adherencia lateral

Cabe destacar que la medida de fuerza lateral con placa dinamométrica es altamente sensible a las características de la superficie de esta. Por lo tanto, en aquellos casos en que no sea posible caracterizar la placa alineadora realizando una serie de ensayos simultáneamente con la dinamométrica, que permitan obtener directamente la relación entre desviación y fuerza lateral, se propone la siguiente alternativa al método expuesto anteriormente. Consiste en sustituir el punto 3 del método anterior por los siguientes dos puntos:

3.1.- Haciendo uso de la Ecuación (5-11) del modelo propuesto en el apartado 5.4.8, se obtiene el valor del ángulo de convergencia que ha producido la desviación lateral medida. Para ello se debe conocer, tanto el valor de la constante del muelle de centrado de la placa alineadora, como la fuerza de rozamiento estático de la misma, obtenidos ambos mediante la calibración periódica.

3.2.- Con el ángulo de convergencia obtenido, se puede ya calcular la fuerza lateral que se habría producido en el caso de circular sobre un suelo rígido, como el de la placa dinamométrica, mediante el modelo representado por la Ecuación (6-3). Para obtener este resultado, resulta también necesario disponer de los valores de presión de inflado del neumático, de la fuerza vertical sobre el mismo, y del resto de constantes que aparecen en dicha ecuación, para representar fielmente las características del contacto específicas para cada binomio neumático-superficie de placa dinamométrica en concreto.

En la Figura 7.4 se presentan las diferencias introducidas por los dos puntos anteriores en el esquema del procedimiento de obtención de la fuerza lateral.

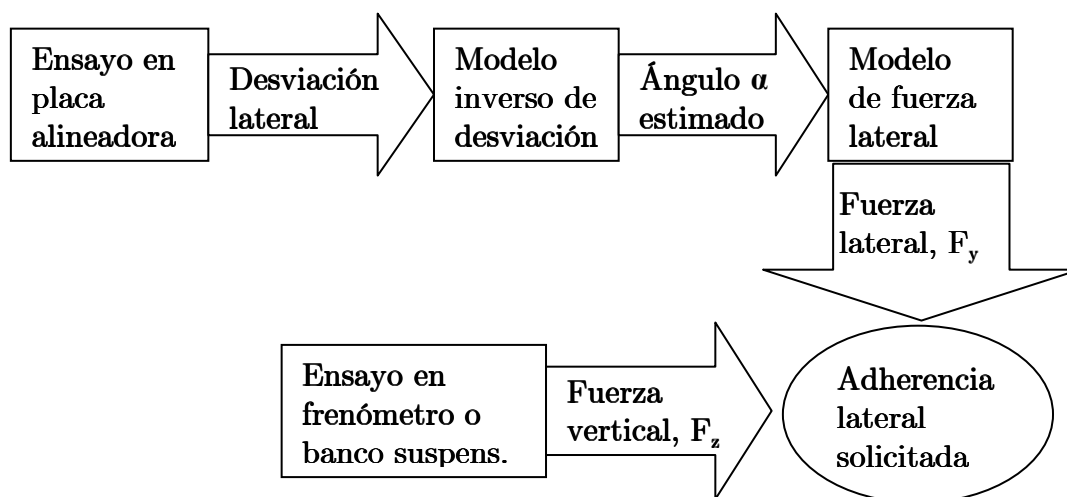


Figura 7.4 Alternativa para la obtención de la adherencia lateral

Al igual que para los otros dos criterios propuestos en este capítulo, en caso de obtener un dictamen de Defecto Grave como resultado del ensayo en la ITV, se ha estimado conveniente permitir la repetición del ensayo hasta tres veces, para confirmar el diagnóstico. Como resultado final se conservaría el más favorable.

Se ha comprobado la eficacia de esta metodología de inspección haciendo uso de los mismos ensayos experimentales de validación ya presentados en el apartado 7.2.2, durante los cuales se registró también la fuerza lateral medida en placa dinamométrica. A continuación se presentan los resultados.

7.3.2 Ensayos de validación

Al igual que para el criterio anterior, las tablas con el conjunto de datos experimentales de los ensayos de validación se encuentran en el Anexo II, en este

caso en la Tabla A-2. En la Tabla 7-6 se presenta una muestra de los mismos, correspondiente a los mismos diez ensayos usados como ejemplo para el Criterio I. En esta tabla se comparan las medidas experimentales de adherencia lateral solicitada (que es el cociente de las fuerzas lateral y vertical medidas en placa dinamométrica) y la adherencia lateral estimada mediante el método propuesto en el apartado anterior. Como se puede observar, para esta muestra de ensayos no existe diferencia alguna en los dictámenes según la adherencia lateral estimada y medida: se obtiene exactamente el mismo dictamen de la inspección en ambos casos. En el conjunto de los ensayos (Tabla A-2), solo se llega a un dictamen distinto en un 1% de los casos, correspondiente a un vehículo que, según la adherencia medida con placa dinamométrica, no presenta defecto, pero según la placa alineadora se diagnosticaría un Defecto Leve. Dado que un Defecto Leve no tiene mayores consecuencias, se considera satisfactoria la estimación de la adherencia lateral mediante la placa alineadora. En la última columna de la tabla se ha incluido el dictamen usado como referencia, consistente en la recomendación estricta de alineación de los fabricantes. Como se puede observar en esta muestra de diez ensayos, en todos los casos se produce un dictamen igual o menos severo que el criterio de referencia. En el conjunto de los datos se da la misma situación: en un 48% de los casos se obtiene el mismo dictamen, y en un 52% un resultado menos severo.

Tabla 7-6 Muestra de ensayos de validación de la Propuesta II de criterio de inspección

Ensayo	μy medida	Desviación lateral medida (m/km)	F_y estimada (N)	μy estimada	Dictamen según μy medida	Dictamen según μy estimada	Dictamen según Referencia
55	0,10	6,44	294	0,10	OK	OK	D.G.
56	0,01	-0,28	50	0,01	OK	OK	OK
57	0,04	2,26	142	0,04	OK	OK	D.L.
58	-0,08	-8,58	-253	-0,06	OK	OK	D.G.
59	-0,13	-14,82	-480	-0,12	D.L.	D.L.	D.G.
60	0,01	0,37	73	0,01	OK	OK	OK
61	0,03	0,52	79	0,03	OK	OK	D.G.
62	0,01	-0,17	53	0,01	OK	OK	OK
63	-0,04	-5,52	-141	-0,03	OK	OK	OK
64	-0,08	-8,11	-236	-0,08	OK	OK	D.G.

En la Tabla 7-7 se presenta un resumen del conjunto de datos de los ensayos de validación. Se puede observar que la presente Propuesta II califica sin

defecto al doble de vehículos que el criterio de referencia (88% de vehículos sin defecto frente a 44% de la estricta aplicación de los valores recomendados por el fabricante). El número de defectos leves y graves, a su vez, es mucho menor: 8% de defectos leves y 4% de graves en la presente propuesta, frente a 10% y 46% respectivamente en el caso del criterio estricto del fabricante.

Tabla 7-7 Resumen conjunto ensayos Criterio II

Resultado aplicación	Propuesta II de Criterio ITV	Criterio fabricante (Referencia)
Vehículo sin defecto	82 (88%)	41 (44%)
Defecto leve	7 (8%)	9 (10%)
Defecto grave	4 (4%)	43 (46%)
Total	93 (100%)	93 (100%)

Del mismo modo que para el criterio anterior, en el apartado 7.5 se analizan otros aspectos prácticos de este método de inspección, de cara a compararlo con los otros dos, y elegir finalmente el que se considera más adecuado para su implantación en la ITV.

7.4 Propuesta III: Criterio universal basado en desviación lateral

En los apartados precedentes se han formulado dos propuestas de criterio de inspección del sistema de dirección de turismos en la ITV que, si bien son perfectamente adecuadas al fin de ofrecer un diagnóstico de la idoneidad del estado en que se encuentra dicho sistema, su aplicación hoy en día por medio de la placa alineadora, como instrumento sustitutivo de otros más indicados pero inviables económicamente, no resulta del todo satisfactoria. Dichos criterios, como se ha visto, están basados en la estimación del ángulo de convergencia en el primer caso, y de la fuerza lateral desarrollada por el neumático, en el segundo, de los vehículos presentados a inspección.

Sin embargo, la placa alineadora sigue siendo, a día de hoy, el instrumento apropiado para efectuar la medida de otra magnitud: la desviación lateral, la cual,

como se ha visto, guarda a su vez una estrecha correlación con el ángulo de convergencia total del eje medido.

De cara a aplicar un criterio basado en la medida de esta magnitud, idealmente los fabricantes de vehículos ensayarían sus modelos en la placa alineadora, e indicarían los valores de desviación lateral entre los que se debería encontrar cualquier unidad en circulación, para considerar que sus ajustes de alineación son los recomendados. Puesto que esta situación no se da actualmente, se debe determinar, en base a los ángulos recomendados por los fabricantes, cuáles son los valores de desviación lateral a partir de los que se puede afirmar que el vehículo presenta unos ajustes de alineación distintos de los recomendados, y en razón de los cuales se merman sus cualidades dinámicas, se perjudica el estado de los neumáticos, o se deteriora innecesariamente el medio ambiente (debido a una mayor resistencia a la rodadura).

En base al estudio realizado sobre la medición con placa alineadora, se persigue desarrollar un criterio que permita identificar aquellos vehículos que, sin lugar a duda, presentan un inadecuado ajuste de la alineación. Se ha considerado más adecuado y factible establecer un límite general para todos los vehículos, que uno particular para cada modelo. Dicho límite debe ser tal que permita al inspector tener un criterio objetivo en que apoyarse a la hora de calificar el estado del sistema de dirección en la ITV, detectando el mayor número posible de vehículos defectuosos, pero sin dar lugar a “falsos positivos”, es decir, sin calificar como defectuoso un vehículo cuya alineación se encuentre dentro de los márgenes establecidos por su fabricante.

Así pues, de cara a formular la propuesta de nuevo criterio de inspección, se va a proceder a estudiar con anterioridad el rango de valores entre los que habitualmente se encuentran los recomendados por los fabricantes de vehículos.

7.4.1 Valores habituales de alineación

En este apartado se presentan, por una parte, los resultados de estudios ya existentes en la bibliografía, y por otra, el análisis llevado a cabo expresamente para esta tesis.

Reimpell (Reimpell, Stoll & Betzler, 2000b) indica que los valores promedio de convergencia total del eje delantero y tolerancia recomendada para los turismos convencionales son los siguientes:

- Para vehículos con tracción trasera: $+0,25^{\circ} \pm 0,17^{\circ}$
- Para vehículos con tracción delantera: $0^{\circ} \pm 0,17^{\circ}$

Muñoz (Muñoz, 2001) realiza un análisis estadístico de los valores de convergencia recomendados por los fabricantes para 70 modelos de turismo, tanto de tracción delantera como trasera, obteniendo una media aritmética de $-0,08^{\circ}$ de convergencia.

Por otro lado, Xu y Qiao (Xu & Qiao, 2005) estudian estadísticamente los valores de desviación lateral registrados en placa alineadora para una muestra de 83 modelos de turismos en un momento dado de su vida útil (con lo cual no tienen por qué corresponder ya con los recomendados, o incluso podrían ser inadecuados). Se obtiene una distribución con media $+1,23$ m/km y varianza de $5,25$ m/km (Figura 7.5).

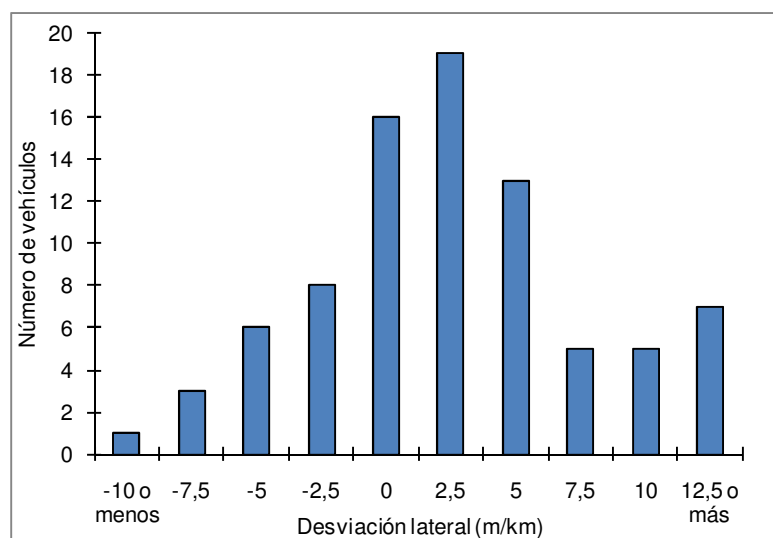


Figura 7.5 Distribución estadística de convergencias según Xu (Xu & Qiao, 2005)

Por último, dentro de los trabajos conducentes a esta tesis doctoral, se ha efectuado un estudio cualitativo sobre los valores recomendados por los fabricantes para los turismos más habituales en España. Este estudio se ha realizado a partir de los datos recogidos en la guía Autodata (Autodata, 2005). Cabe destacar que en la guía Autodata, y para algunos modelos en particular, se recogen dos tipos de datos de alineación: unos valores “de comprobación”, y otros “de reglaje”. En aquellos casos en que existe una diferencia entre ambos, los de comprobación muestran una tolerancia más amplia, y significan que si el resultado de la medida se encuentra entre sus límites, no es necesario efectuar un ajuste; se consideran adecuados para el vehículo. Solo en caso de que la medida se encuentre fuera de los

límites de comprobación se debe llevar a cabo el ajuste, que deberá dejar el parámetro ajustado dentro de unos límites más estrechos que los de comprobación. Por ejemplo, el ángulo de convergencia de un Ford Fiesta de 2004 se considera correcto si al medirlo tiene un valor de $0,30 \pm 0,35^\circ$. En caso de encontrarse fuera de ese rango, después del ajuste debe quedar en $0,30 \pm 0,17^\circ$, es decir, con la mitad de tolerancia. Como conclusiones más destacables del estudio se han obtenido las siguientes:

- Por lo general, para los vehículos con tracción trasera se recomienda un ángulo de convergencia delantera positivo, de acuerdo con los efectos de la transmisión de potencia mencionados en el apartado 2.2.1.4. Dado que además estos turismos suelen contar con potencias considerables, sus ángulos recomendados son elevados, yendo de $+0,3^\circ$ (BMW Serie 3) a $+0,58^\circ$ (Mercedes Clase S). Este último, que constituye el máximo absoluto, tiene recomendada una tolerancia de $\pm 0,17^\circ$.
- En los turismos con tracción delantera, los ángulos de convergencia suelen ser mayoritariamente negativos, aunque no muy elevados. Por ejemplo, para la totalidad de los pertenecientes a las marcas Renault, Peugeot y Citroën se recomiendan convergencias negativas, mientras que los Opel, Ford y Fiat tienen convergencias próximas a cero, tanto negativas como positivas. El mínimo valor encontrado ha sido de $-0,33^\circ$, para el Citroën Saxo, cuyo fabricante establece una tolerancia de $\pm 0,17^\circ$.
- En cuanto al rango de tolerancia establecido por los fabricantes, este suele estar en torno a $\pm 0,2^\circ$, siendo también habitual hasta $\pm 0,3^\circ$, y llegando excepcionalmente a $\pm 0,45^\circ$ como máximo (p.ej. los de marca Honda), y $\pm 0,07^\circ$ como mínimo (Volkswagen Passat).

7.4.2 Planteamiento del límite de rechazo

Si no se tuvieran en cuenta los resultados de los valores de alineación mostrados en el apartado anterior, se podría considerar el planteamiento de un límite de desviación lateral en el que el valor absoluto del límite fuera el mismo, tanto para desviaciones positivas como para negativas. Sin embargo, a la vista de los mismos (Figura 7.6), se pone de manifiesto que los valores recomendados por los fabricantes resultan en desviaciones laterales de mayor magnitud en las que

corresponden a ángulos de convergencia positivos ($+0,58^\circ$) que a los negativos ($-0,33^\circ$). Como se ha indicado, estas diferencias se pueden achacar a unos mayores efectos de transmisión de potencia en los vehículos de tracción trasera, que suelen contar con motores más potentes. Por lo tanto, el criterio a proponer debería tener en cuenta dicha característica, para aumentar la eficiencia en el diagnóstico de defectos. En caso de establecer un límite “simétrico” respecto del cero, se estarían permitiendo mayores desajustes con desviación negativa que positiva, ya que los máximos valores recomendados (en valor absoluto) para desviaciones negativas, son más pequeños que los de aquellas positivas. En este sentido, resulta especialmente importante resaltar que el valor que se menciona actualmente en el Manual ITV de ± 10 m/km de desviación lateral, simétrico respecto al cero, puede resultar en el rechazo de algún vehículo con una mínima desalineación, de entre los que tienen un ángulo recomendado positivo, mientras que resultaría permisivo en vehículos con convergencia recomendada negativa que se encontrasen incluso considerablemente desajustados.

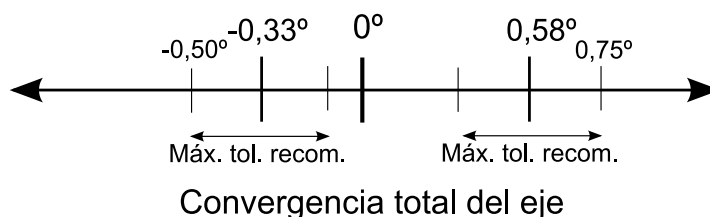


Figura 7.6 Rango de convergencias recomendadas

Con el fin de formular el límite de rechazo, se debe considerar, aparte del rango en que se mueven los ángulos de convergencia recomendados, las tolerancias también establecidas por los fabricantes que, en el caso del máximo y mínimo ángulo recomendado, son ambas de $\pm 0,17^\circ$.

En definitiva, el límite de rechazo a proponer debe asegurar que un valor de desviación correspondiente al máximo y mínimo de la convergencia recomendada por los fabricantes (teniendo en cuenta el caso más desfavorable del valor de tolerancia recomendado para cada caso), no sea calificado como defectuoso. Sin embargo, esta condición implica que algunos vehículos que se encuentren desajustados respecto del ángulo recomendado por los fabricantes no sean detectados por el resultado de medida de desviación lateral. No obstante, en el caso de que dicho desajuste resultara peligroso para la seguridad, sus efectos podrían ser percibidos por el inspector de la ITV a raíz del ruido producido por el deslizamiento del neumático respecto al suelo al ser forzado a seguir una dirección

de desplazamiento muy diferente a la marcada por su plano medio, o por el consiguiente desgaste de los neumáticos. Teniendo en cuenta estos casos, se ha establecido la posibilidad de señalar un Defecto Leve en este apartado a criterio del inspector.

Otro factor a tomar en consideración a la hora de plantear el criterio son las características técnicas de los alineadores al paso actualmente disponibles en el mercado, y los instalados en las ITV. La mayoría de ellos tienen un rango de medida de ± 20 m/km. Sin embargo, el mínimo rango encontrado ha sido de ± 15 m/km, por lo que la propuesta de límite a establecer no debe ir más allá de este valor, para garantizar que todos los alineadores al paso son capaces de detectarlo.

Por otro lado, es conveniente establecer una cierta graduación de los defectos, advirtiendo al propietario del vehículo de aquellos desajustes menores de la alineación que sería recomendable solventar, a pesar de que no supongan un riesgo significativo para la circulación. Se reservaría la calificación de Defecto Grave (que es aquel que hace necesaria una subsanación y posterior visita a la ITV en el plazo de dos meses, no pudiendo circular más que en lo estrictamente necesario para su reparación) para aquellos desajustes importantes que disminuyen la seguridad del vehículo o perjudican el medio ambiente.

Teniendo en cuenta todas las condiciones anteriores, se ha desarrollado la siguiente propuesta de metodología de inspección:

Como punto de partida se han tomado los valores extremos de convergencia recomendada encontrados (correspondientes al ángulo recomendado más la máxima tolerancia). Estos valores de convergencia total por eje han sido $-0,50^\circ$ y $+0,75^\circ$ (Figura 7.6), y los mismos producirían, en base al modelo de desviación lateral formulado mediante la Ecuación (5-10), y teniendo en cuenta el margen de error que este modelo proporciona y la variabilidad de la medida con placa alineadora, una desviación lateral de -8 m/km y $+12$ m/km, respectivamente.

Por lo tanto, ningún modelo de vehículo con el ajuste de convergencia dentro de las tolerancias marcadas por el fabricante debería obtener resultados de medida de desviación lateral fuera del rango comprendido entre -8 m/km y $+12$ m/km. Cualquier valor superior a los mismos, y hasta el límite de Defecto Grave que se determinará a continuación, se consideraría Defecto Leve, lo cual indicaría al propietario la conveniencia de revisar la alineación.

Al margen de la medida de la placa alineadora, como se ha indicado, se permitiría al inspector evaluar el desajuste de la alineación a partir de sus efectos sobre el desgaste irregular de los neumáticos, que produce unas marcas características en la banda de rodadura, según se observa en la Figura 7.7. Así, también se podrían calificar como Defecto Leve aquellos desajustes de vehículos con ángulos de convergencia recomendados próximos a cero, y con tolerancias pequeñas, que se vean ampliamente superadas, pero sin que ello signifique que lleguen a valores superiores a $-0,50^\circ$ o $+0,75^\circ$, que serían los mínimos para constituir defecto según el presente criterio. Cabe señalar que en la actual redacción del Manual de Procedimiento, sólo se puede calificar como defecto de la alineación si se cumple la condición de que la desviación medida es superior a ± 10 m/km, y siempre es Defecto Grave.

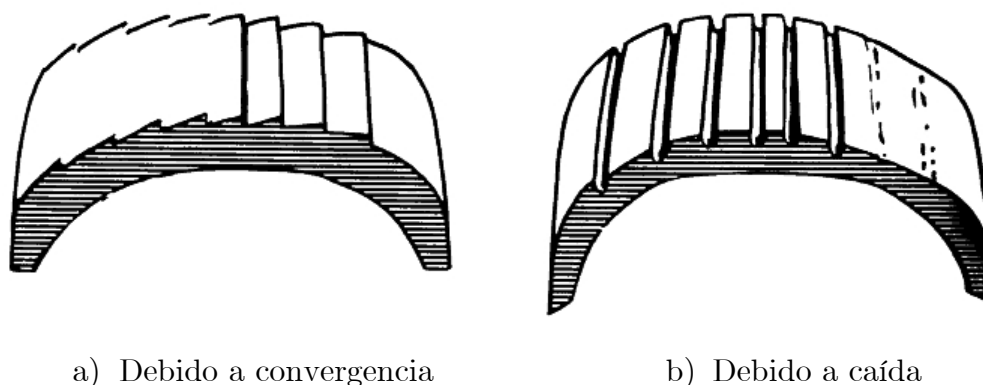


Figura 7.7 Desgastes típicos por incorrecta alineación

Cuando se superan en más de unos $0,2^\circ$ los rangos de tolerancia de ángulo de convergencia máximos recomendados por el fabricante, resultan apreciables los efectos negativos sobre el vehículo, que se manifiestan por una elevada resistencia a la rodadura y un característico ruido debido al elevado deslizamiento producido entre neumático y suelo. Dichos efectos negativos son merecedores de la calificación de Defecto Grave en la ITV, por las consecuencias que tienen sobre la conducción. Por lo tanto, aplicando ese margen de $0,2^\circ$ a los valores extremos de convergencia recomendados ($-0,50^\circ$ y $+0,75^\circ$) se obtiene que para convergencias totales por eje superiores o iguales a $-0,70^\circ$ y $+0,95^\circ$, el estado de la alineación se calificaría ya con Defecto Grave. Estos valores se traducen por desviaciones laterales de aproximadamente -11 m/km y $+15$ m/km, desviaciones estas que son medibles incluso por el alineador al paso de menor rango de medida encontrado.

Si los límites así establecidos se comparan con los propuestos por García-Pozuelo en su tesis (García-Pozuelo, 2008), en la Tabla 7-8 se observa que estos últimos resultan más amplios, aunque, al ser simétricos respecto al cero, los límites de ambos criterios para las convergencias positivas se encuentran próximos.

Tabla 7-8 Comparación con los límites propuestos por García-Pozuelo

	Criterio III Presente tesis	García-Pozuelo
Límite inferior Defecto Leve	-0,50 °	-0,80 °
Límite superior Defecto Leve	+0,75 °	+0,80 °
Límite inferior Defecto Grave	-0,70 °	-1,20 °
Límite superior Defecto Grave	+0,95 °	+1,20 °

Cabe señalar que un desgaste irregular excesivo del neumático ya es considerado como Defecto Grave en el Manual de Procedimiento, en el apartado 8.3: Neumáticos, por lo que no es necesario incluirlo como Defecto Grave en el apartado 7.1: Desviación de ruedas. Por otro lado, si el inspector observara que algún elemento de la timonería o rótulas de la dirección puede causar una incorrecta alineación en alguna condición de funcionamiento, debido a su estado defectuoso, lo puede calificar como Defecto Grave dentro del apartado correspondiente (7.4) del Manual.

Ya que, como se ha indicado, la medición mediante alineador al paso presenta una cierta variabilidad (discutida en el apartado 5.4.8), y con el objetivo de otorgar las máximas garantías al dictamen de la inspección, en caso de obtenerse un resultado de la medida que implique la calificación como Defecto Grave, se considera conveniente que se pueda repetir el ensayo hasta tres veces, conservando como resultado definitivo el de menor módulo.

El criterio así descrito sería perfectamente factible a corto plazo en la ITV en España, ya que no requiere ninguna modificación en cuanto a material, ni de las operaciones a llevar a cabo. Únicamente habría que modificar el Manual de Procedimiento según la nueva redacción que se presenta a continuación, adaptar los sistemas informáticos y formularios, e informar al personal implicado.

En resumen, la nueva metodología quedaría recogida en la siguiente propuesta de nueva redacción del apartado correspondiente (7.1) del Manual de Procedimiento:

a.- ESPECIFICACIONES GENERALES

Todo vehículo a motor debe estar provisto de un mecanismo adecuado que permita al conductor mantener la dirección del vehículo y modificarla con facilidad, rapidez y seguridad.

b.- MÉTODO

Para realizar esta inspección se utilizará una placa alineadora (o alineador al paso).

El vehículo deberá pasar perfectamente alineado por la placa, circulando a marcha lenta y se registrará la desalineación de las ruedas del eje o de los ejes directrices.

Esta inspección deberá ser complementada con una inspección visual en foso o elevador, comprobándose desgastes irregulares en los neumáticos y el estado general de los órganos de dirección.

Al utilizarse el alineador al paso deberá exigirse que el vehículo se presente en orden de marcha. En caso de portar una carga adicional, esta deberá ser retirada, ya que el valor de la alineación depende del punto del recorrido en que se encuentre la suspensión.

En caso de obtener un resultado de la medida que implique la calificación como Defecto Grave, se podrá repetir el ensayo hasta tres veces, conservando como resultado definitivo de desviación lateral el de menor módulo.

c.- REGLAMENTACIÓN APLICABLE

General: Reglamento General de Vehículos, Art. 11.5 ¹

Particular: Ninguna.

d.- INTERPRETACIÓN DE DEFECTOS

¹ En este artículo se establece que los vehículos “deben estar provistos de un mecanismo adecuado que permita al conductor mantener la dirección del vehículo y modificarla con facilidad, rapidez y seguridad”.

	<i>Calificación</i>		
	<i>Defecto Leve</i>	<i>Defecto Grave</i>	<i>Defecto Muy Grave</i>
1.- El vehículo presenta desalineación entre -8 m/km y -11m/km, o entre +12 m/km y +15 m/km en alguno de sus ejes directrices	X		
2.- El vehículo presenta desalineación inferior o igual a -11 m/km o superior o igual a +15 m/km en alguno de sus ejes directrices		X	
3.- El vehículo presenta desgaste irregular de neumáticos en alguno de sus ejes directrices, debido a una incorrecta alineación	X		

Mediante el criterio propuesto deja de ser necesario que los neumáticos presenten desgaste irregular para poder calificar con defecto la inspección, lo cual representa una de las carencias más importantes del criterio actual, ya que se puede haber instalado unos neumáticos nuevos, inmediatamente antes de someterse a la ITV, en un vehículo con la alineación desajustada. La calificación de los defectos a partir de la desviación lateral medida mediante el alineador al paso es objetiva; no depende del criterio del inspector, sino únicamente del valor obtenido en el ensayo. Además, aparece la posibilidad de calificar con Defecto Leve aquellas deficiencias que no sean tan peligrosas como para requerir una inmediata subsanación y nueva visita a la ITV. En todo caso, el inspector no podrá calificar, únicamente en base a su criterio, un defecto en este apartado del manual como grave.

Un último aspecto que se debe tomar en consideración de cara a la posible adopción en la práctica del presente criterio en el Manual ITV es que los límites que se proponen en esta tesis se han establecido en base a los ángulos de convergencia máximo y mínimo recomendados para los turismos convencionales que se encuentran en circulación hoy en día. Sin embargo, podría darse el caso que en un futuro apareciese otro vehículo con un ajuste recomendado para el ángulo de convergencia que excediese el máximo valor positivo de $+0,58^\circ$ que posee actualmente el Mercedes Clase S, o los $-0,33^\circ$ por la parte negativa del Citroën

Saxo. Por lo tanto, sería imprescindible que en cada revisión del Manual ITV se comprobara si estos máximo y mínimo siguen siendo los mismos. Cabe señalar que cuando se dispone de una base de datos informatizada con los valores de los ángulos recomendados para los turismos, como la incorporada en los medidores de ángulos, este proceso de actualización es inmediato.

Finalmente, se ha comprobado la eficacia en el diagnóstico del criterio anteriormente formulado, mediante los ensayos que se presentan en el apartado siguiente.

7.4.3 Ensayos de validación

Se ha hecho uso de los mismos ensayos de validación que los empleados para las dos propuestas de criterio de inspección de la dirección en la ITV anteriores. En este caso, se ha analizado la eficacia de unos valores límite de desviación lateral iguales para todos los vehículos.

Como para los criterios anteriores, la totalidad de los resultados obtenidos de los ensayos se encuentran recogidos en el Anexo II, en este caso en la Tabla A-3. Una muestra de los mismos, correspondiente al mismo conjunto de diez inspecciones ya utilizadas para la validación de los otros dos criterios propuestos, se presenta en la Tabla 7-9.

Tabla 7-9 Ensayos de validación de la Propuesta III de criterio de inspección

Ensayo	Desviación lateral, Dl (m/km)	Dictamen según Dl	Dictamen según Referencia
55	6,44	OK	D.G.
56	-0,28	OK	OK
57	2,26	OK	D.L.
58	-8,58	D.L.	D.G.
59	-14,82	D.G.	D.G.
60	0,37	OK	OK
61	0,52	OK	D.G.
62	-0,17	OK	OK
63	-5,52	OK	OK
64	-8,11	D.L.	D.G.

Como se ha indicado, se ha buscado expresamente que los límites del criterio fuesen conservadores: es decir, que en ningún caso se obtuvieran resultados

más negativos que los resultantes de la aplicación del criterio Referencia del fabricante (última columna de la tabla). Se puede comprobar que esta premisa se cumple, tanto en la Tabla 7–9 de muestra, como en la completa (Tabla A–3).

Por otro lado, todas las medidas calificadas como defecto mediante este criterio corresponden a vehículos que se encuentran efectivamente desajustados con respecto a las recomendaciones del fabricante, es decir, la última columna. En el caso de los defectos graves detectados, los efectos del desajuste se hacen también patentes en forma de desgaste irregular del neumático, o ruido evidente al circular, con una resistencia a la rodadura elevada. Cabe destacar que el criterio de Referencia califica como DG a un número elevado de vehículos particulares que circulan normalmente por la vía pública sin presentar signos de desgaste irregular en los neumáticos ni deterioro apreciable de sus cualidades dinámicas al circular, lo cual, según ya se ha indicado, para Michelin supondría que el ajuste de la alineación es adecuado (Descamps, 2003). Sin embargo, con la presente propuesta III de criterio de inspección, el número de vehículos calificados con DG se ve reducido considerablemente, limitándose a aquellos que muestran signos importantes de desajuste que representan un peligro para la circulación.

En la Tabla 7–10 se muestra un resumen de los resultados de la aplicación del presente criterio a los 93 ensayos de validación. Como se puede observar, el número de vehículos calificados como “sin defecto” es prácticamente el doble que según el criterio de referencia, y el número de defectos, especialmente el de los graves, es mucho menor.

Tabla 7–10 Resumen conjunto ensayos Criterio III

Resultado aplicación	Propuesta III de Criterio ITV	Criterio fabricante (Referencia)
Vehículo sin defecto	81 (87%)	41 (44%)
Defecto leve	5 (5%)	9 (10%)
Defecto grave	7 (8%)	43 (46%)
Total	93 (100%)	93 (100%)

En definitiva, a partir de los resultados obtenidos se puede concluir que los límites de desviación propuestos para este criterio ofrecen una buena indicación de los vehículos que presentan defectos en la alineación de la dirección, tanto leves como graves, en función del ángulo de convergencia total del eje. Se cumple la

condición de que estos límites únicamente califiquen con Defecto Grave la alineación en un vehículo cuando este presente un importante desajuste en la misma, cuyos efectos sobre el desgaste irregular de los neumáticos y el deterioro de las cualidades dinámicas sean perceptibles.

A continuación, se realiza una comparativa de los tres criterios de inspección propuestos, en base al resultado de la inspección para los 93 ensayos de validación comunes, y a otros aspectos que van a determinar la elección de uno de los tres como el más indicado para su aplicación práctica a corto plazo en la ITV.

7.5 Comparativa de los criterios propuestos

Como ya se ha indicado, las tres propuestas de nuevo criterio de inspección de la alineación en la ITV se basan en distintos parámetros para lograr el objetivo compartido de detectar aquellos vehículos cuya alineación puede representar un peligro para la circulación, por lo que su aplicación sobre un mismo vehículo no tendría por qué resultar en igual dictamen en la ITV. En cualquier caso, en la Tabla 7-11 se recoge un resumen de los resultados de la inspección según la aplicación de cada uno de los criterios propuestos, así como su comparación con el criterio que se ha tomado de referencia, consistente en comprobar si la medida exacta del ángulo de convergencia mediante un medidor de ángulos convencional se encuentra dentro de la tolerancia establecida por el fabricante.

Tabla 7-11 Resumen resultados inspección

Resultado aplicación	Propuesta I de Criterio ITV	Propuesta II de Criterio ITV	Propuesta III de Criterio ITV
Vehículo sin defecto	55 (59%)	82 (88%)	81 (87%)
Defecto leve	18 (19%)	7 (8%)	5 (5%)
Defecto grave	20 (22%)	4 (4%)	7 (8%)
Total	93 (100%)	93 (100%)	93 (100%)
Comparado con Referencia			
Mismo resultado	59 (63%)	45 (48%)	48 (52%)
Más severo	3 (3%)	0 (0%)	0 (0%)
Menos severo	31 (33%)	48 (52%)	45 (48%)

En la Tabla A-4 del Anexo II se compara, ensayo a ensayo, el resultado de la aplicación de los tres criterios propuestos para los 93 ensayos realizados.

A la vista de los resultados de cada criterio, se pueden extraer varias conclusiones:

- El criterio I de inspección calificaría con Defecto Grave uno de cada cinco vehículos, lo cual es una cifra elevada si se tiene en cuenta que actualmente esa es la proporción de vehículos rechazados por el total de apartados del Manual ITV (Europa Press, 2008). En cualquier caso, los límites que se han establecido para este criterio ya han sido significativamente más permisivos que el criterio de referencia del fabricante, según el cual se rechazaría prácticamente la mitad de los vehículos ensayados. Por lo tanto, no sería razonable adoptar el Criterio I en las ITV a corto plazo, sin haber llevado a cabo anteriormente medidas de concienciación sobre la necesidad de ajustar la alineación frecuentemente a las tolerancias establecidas por el fabricante. Más aún si se recuerda que según especialistas como Michelin, lo importante no es tanto estar dentro de las tolerancias del fabricante, sino que no se produzcan efectos negativos por una alineación, aunque se encuentre fuera de especificaciones. Por otro lado, el criterio I arroja un dictamen más severo que el criterio de referencia del fabricante en un 3% de los casos. Aunque en los casos concretos de los ensayos ninguno de los defectos fueron graves, la posibilidad de que esto se produzca lleva a no hacer recomendable dicho criterio.
- El criterio II de inspección, según lo definido por García-Pozuelo (García-Pozuelo, 2008), y aplicado mediante la placa alineadora, resulta relativamente permisivo: únicamente un 4% de los vehículos ensayados serían calificados con Defecto Grave y, por lo tanto, no superarían la inspección. Aún así, este porcentaje es casi el doble de los que en la actualidad son rechazados en el apartado 7.1 del Manual ITV (Desviación de ruedas) (Díaz et al., 2007). Por otro lado, en los ensayos de validación, la aplicación de este criterio no resultó en un dictamen más severo que la del criterio de referencia, lo cual representa una de las premisas básicas de cara a la aplicación práctica de las nuevas propuestas en la ITV. Sin embargo, este

criterio presenta un punto mejorable (y como tal será recogido en el apartado 8.2, Desarrollos futuros): según su definición por García-Pozuelo, los límites de defecto para el ángulo de convergencia son simétricos respecto a 0° , con lo que dejarían de detectarse un número importante de defectos en los vehículos cuyo ángulo de convergencia recomendado es negativo, ya que, según se indicó en el apartado 7.4.2, estos vehículos (que, por otro lado, constituyen la mayoría del parque) presentan ángulos de convergencia recomendados de menor magnitud que aquellos con ajustes positivos.

- En cuanto a la propuesta III de criterio, se ha obtenido en los ensayos de validación un porcentaje de rechazo (Defecto Grave) de más del 7%. Esta cifra parece una proporción razonable de rechazos de cara a una posible aplicación inmediata en la ITV, ya que en la actualidad, la tasa de defectos en el capítulo de dirección del Manual de Procedimiento es de un 6,32% (Díaz et al., 2007). Además, se ha comprobado que los vehículos rechazados eran aquellos en los que los efectos de una incorrecta alineación eran perceptibles incluso antes de realizar la medida, siendo en su mayoría aquellos a los que se había modificado ex profeso su ángulo de convergencia a valores inadecuados. Al igual que para el criterio II, se cumple la condición de que, en ninguno de los casos, se ha obtenido un dictamen más desfavorable que el criterio de referencia del fabricante. Comparado con el criterio II, el III obtiene en un mayor número de ocasiones el mismo dictamen que el criterio de referencia (52% frente a 48%).

Dejando a un lado los resultados concretos de la aplicación de uno u otro criterio en cuanto a su eficacia, otro factor importante a considerar a la hora de proponer definitivamente la adopción en la ITV de una de las propuestas que se han desarrollado en la presente tesis es la facilidad para la implantación de las mismas en el proceso de inspección y su viabilidad hoy en día. En este sentido, se puede indicar lo siguiente de cada uno de los criterios propuestos:

- En cuanto a la factibilidad técnica de la posible implantación del criterio I de inspección, esta propuesta de modificación del actual procedimiento de inspección no tendría ningún impacto sobre el tiempo de realización del ensayo en sí. Únicamente implicaría cambios en los sistemas informáticos a nivel de cada estación ITV, y

a nivel nacional (por la base de datos de convergencias recomendadas). Posiblemente también se necesitaría modificar en cierta medida la normativa en caso de incluir los datos de alineación en el documento del CoC. Por lo que respecta a los fabricantes, apenas tendría repercusión comunicar el ángulo recomendado para cada número de bastidor. Sin embargo, el hecho de que los límites para defectos estén basados en la recomendación específica del fabricante para cada vehículo, hace que el número de rechazos en la ITV sea muy elevado, y esto a pesar de que la definición de este criterio prevea márgenes adicionales sobre la tolerancia establecida por los propios fabricantes. Así, sería de esperar una reacción de incomprensión por parte de los propietarios de vehículos al ver sus vehículos rechazados en la ITV por este concepto cuando, al igual que ha pasado con los vehículos empleados en los ensayos de validación, en su mayoría son vehículos que circulan habitualmente por la vía pública sin presentar aparentemente defectos ligados a la alineación. Por este motivo, aunque en teoría este criterio sería el más acorde con las recomendaciones internacionales en la materia, y se basa en el dato más objetivo al respecto, que es el ángulo de convergencia que el fabricante ha determinado como más apropiado para el vehículo, quizás no sería el más adecuado a día de hoy para una puesta en práctica en la ITV.

- La propuesta II de criterio de inspección quizás sea la que más cambios requiera respecto al actual procedimiento en las estaciones ITV en cuanto a procedimiento y organización, sobre todo en el caso de utilizar el procedimiento alternativo para la estimación de la fuerza lateral mediante la placa alineadora. En dicho caso se alargaría ligeramente el tiempo de inspección. Se ha estimado que se necesitarían alrededor de quince segundos para medir e introducir manualmente en el sistema la presión del neumático, necesaria para el modelo de fuerza lateral. El resto de cálculos y medidas se integrarían dentro del sistema informático de la ITV, no necesitando intervención por parte del inspector. Al margen de estos aspectos prácticos, este criterio se basa en un parámetro objetivo para todos los vehículos, como es la adherencia lateral, pero como se ha

indicado, presenta el inconveniente de ser más permisivo con los vehículos cuya convergencia recomendada tiene valores negativos. Por este motivo, el criterio II tampoco va a ser escogido como el más recomendado para su implantación inmediata en las ITV.

- El tercero de los criterios propuestos no supondría ningún cambio organizativo respecto al proceso actual de inspección en las ITV; no necesitaría de la creación de una nueva base de datos como el criterio I, ya que los límites propuestos son comunes para todos los vehículos. Estaría en parte basado en las recomendaciones internacionales, ya que los límites propuestos han tenido en cuenta los ángulos de convergencia recomendados por los fabricantes. Además, el porcentaje de rechazos en la ITV que se producen con su aplicación es perfectamente asumible por el estado general de la alineación que se ha constatado mediante los ensayos de validación con una muestra del parque en circulación. Respecto al criterio II propuesto, el III detectaría un mayor número de defectos, especialmente aquellos que irían desde los $-0,50^\circ$ (límite inferior para DL del criterio III) hasta los $-0,80^\circ$ del criterio II, y de la misma manera para los DG: hasta una convergencia de $-1,20^\circ$ el criterio II no califica el DG, mientras que con el III se hace a partir de $-0,70^\circ$. En la parte de ángulos positivos, los límites están más cercanos, pero igualmente solo se calificarían con DG los ángulos a partir de $+0,95^\circ$ con el criterio III, mientras que el II solo lo hace a partir de $+1,20^\circ$. Lógicamente, lo ideal sería que los fabricantes proporcionaran un valor de desviación lateral recomendado para sus vehículos, así como una tolerancia, pero a falta de ello, la única opción para establecer los límites propuestos ha sido basarlos en los valores recomendados de convergencia.

En conclusión, se considera especialmente satisfactoria la propuesta número III de criterio de inspección de la alineación, basada en un límite de desviación igual para todos los vehículos. Dicha propuesta reúne los aspectos positivos de las propuestas I y II, y elude en gran medida sus aspectos negativos, suponiendo una mejora destacable sobre el actual procedimiento de inspección. Por los motivos expuestos, se elige la propuesta III para proponerla como sustitución del apartado 7.1, desviación de ruedas, del Manual de Procedimiento ITV, pudiendo adoptarse sin mayor inconveniente en un plazo inmediato.

Capítulo 8 Conclusiones y desarrollos futuros

En la Figura 8.1 se presenta un esquema de las fases que se han seguido para la consecución de esta tesis doctoral. Como resultado de los trabajos realizados que se indican en la figura, se han obtenido las conclusiones que se recogen en el próximo apartado. Posteriormente, se indicarán los posibles desarrollos futuros, como continuación de los realizados en esta tesis.

8.1 Conclusiones

La iniciativa para llevar a cabo este trabajo surgió de las carencias detectadas en la literatura científica en relación a la medida de desviación lateral por medio de la placa alineadora, unido a las oportunidades de mejora identificadas en la normativa relativa a la inspección del sistema de dirección durante la ITV, ámbito este de gran interés para la seguridad vial, pero también para la economía y el medio ambiente, ya que el consumo de combustible se incrementa por una inadecuada alineación.

Como principal objetivo marcado, que se ha convertido en la aportación principal de esta tesis, se han desarrollado tres metodologías y criterios de

inspección del sistema de dirección de turismos en la ITV, que suponen una mejora respecto a la situación actual, mediante la utilización de la placa alineadora como instrumento para dictaminar el estado de la alineación.

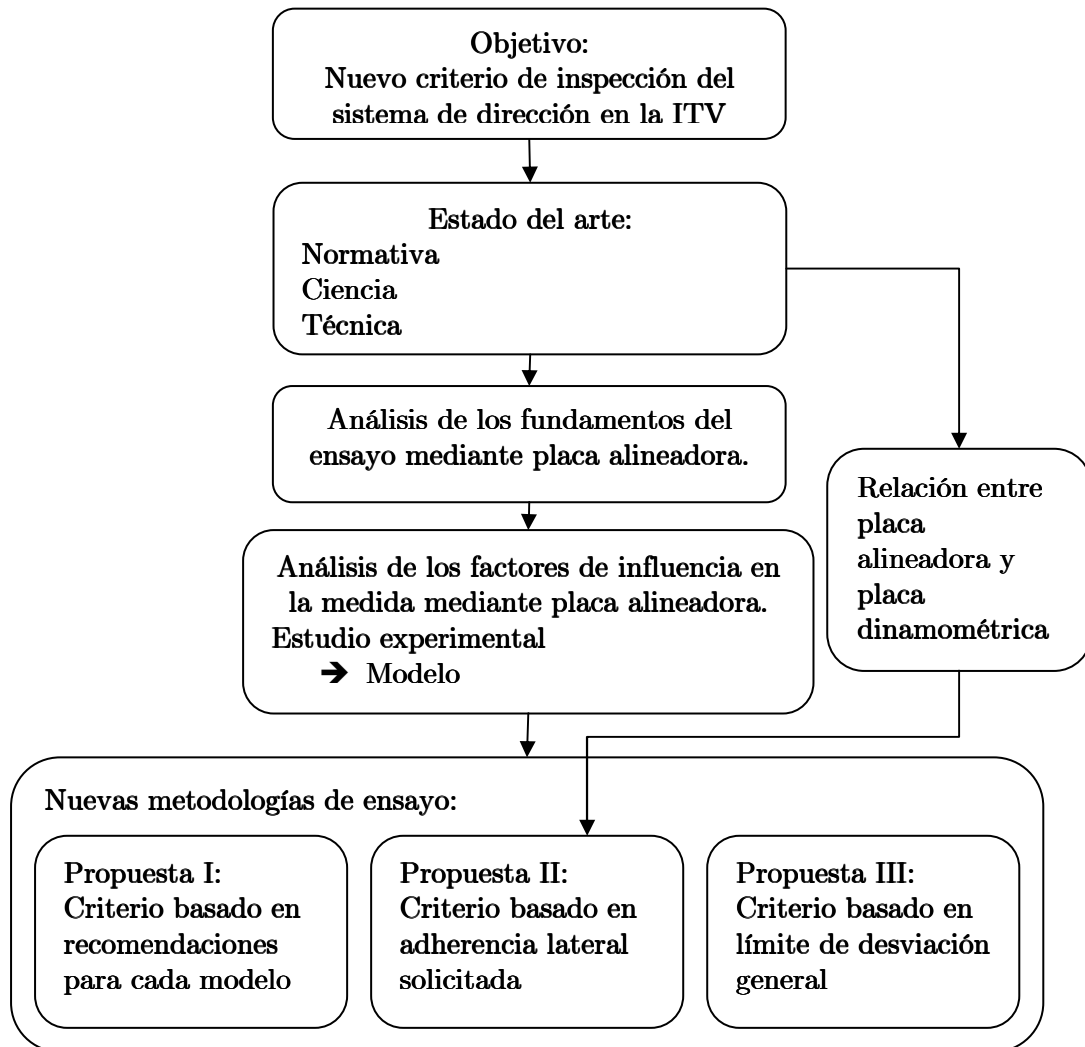


Figura 8.1 Esquema de las fases seguidas en la realización de la tesis

En la primera de las propuestas, se plantea la utilización de la placa alineadora como sustitutivo de un instrumento más directo y preciso para la medición del ángulo de convergencia. Los límites de aceptación o rechazo en la ITV están particularizados para cada modelo de vehículo, en función de las recomendaciones establecidas por su fabricante. De esta forma se pretende asegurar que el vehículo mantiene las características del sistema de dirección que le permitieron obtener la homologación.

La segunda propuesta consiste en la aplicación de un método de inspección basado en la adherencia lateral detraída por un incorrecto ajuste de la alineación. Para ello se plantea la utilización de la placa alineadora como instrumento sustitutivo de una placa dinamométrica, para determinar la fuerza lateral que se produce entre el neumático y el suelo fijo, en condiciones normales de circulación. Cuanto menor sea esta fuerza permanente, mayor será la capacidad del neumático para asumir esfuerzos adicionales necesarios para dirigir el vehículo.

La última de las tres propuestas consiste en un método basado en la medida de desviación lateral mediante placa alineadora. Se ha determinado un límite de desviación lateral correspondiente al rango de convergencias en que no debería encontrarse ningún vehículo correctamente ajustado, igual para todos los modelos de vehículo, lo cual la hace la más factible de las tres propuestas. Para ello ha habido que estudiar previamente los valores recomendados por los fabricantes, resultando en el establecimiento de un límite asimétrico respecto del cero, lo cual constituye también un aspecto novedoso. Desviaciones laterales entre -8 y $+12$ m/km no supondrían defecto. Las superiores a los anteriores, y por debajo de -11 y $+15$ m/km conllevarían la calificación de Defecto Leve, y las superiores o iguales a estas últimas, llevarían aparejadas la obligación de ajustar su alineación y volver a pasar la inspección (Defecto Grave).

Cada una de las tres propuestas de mejora del método de inspección de la dirección en ITV ha sido validada mediante ensayos experimentales, resultando especialmente satisfactoria la propuesta número III, de límite de desviación igual para todos los vehículos, por lo que es la que finalmente se recomienda considerar de cara a una posible implantación en el Manual de Procedimiento de ITV, ya que supone una clara mejora sobre el procedimiento de inspección actual, sin suponer, no obstante, un incremento excesivo y repentino del número de vehículos calificados con Defecto Grave en la inspección en el apartado de desviación de ruedas, ni un incremento en la complejidad ni en los tiempos de inspección.

Para llegar a este resultado, ha sido necesario completar una serie de fases sucesivas, que han permitido obtener las conclusiones que se detallan a continuación, y que constituyen aportaciones adicionales de la tesis.

En primer lugar, se ha estudiado la normativa existente sobre la verificación del sistema de dirección de vehículos automóviles de tipo turismo. Se detectaron oportunidades de mejora en la manera en que se está utilizando la placa

alineadora, ya que actualmente se encuentra instalada en todas las líneas ITV, pero su utilización no se traduce en un criterio claro de diagnóstico de la alineación de los vehículos.

Se han analizado otros dispositivos existentes para la medición de la alineación, llegando a la conclusión de que, hoy en día, la placa alineadora es el instrumento más adecuado para llevar a cabo la inspección del sistema de dirección en la ITV.

Se han estudiado las consecuencias negativas de la alineación en mal estado, comprobando que su efecto sobre el desgaste irregular de los neumáticos resulta especialmente peligroso, sin olvidar el perjuicio sobre las cualidades dinámicas del vehículo, ni el deterioro innecesario del medio ambiente que produce un inadecuado ajuste.

Se ha efectuado un análisis en profundidad de los fundamentos en que se basa la medida mediante placa alineadora. Como resultado se ha obtenido la curva característica de funcionamiento de la placa, la cual no se hallaba por el momento en la bibliografía. También se ha podido determinar el efecto de la placa de relajación en la medida, y los desplazamientos detallados de cada rueda que permiten distinguir el modo en que el ángulo de convergencia individual de cada rueda del eje contribuye al desplazamiento de la placa, a pesar de que el desplazamiento total se debe al ángulo de convergencia total del eje.

El análisis experimental de los distintos factores que pueden influir en la desviación lateral medida en placa alineadora ha permitido concluir que, aparte del ángulo de convergencia, ningún factor influye de manera importante en la medida. Al menos, dicha influencia no supera la propia variabilidad de la medida, que se ha situado en ± 3 m/km.

Se ha propuesto un modelo mixto teórico-empírico para calcular la desviación lateral que produce un determinado ángulo de convergencia, teniendo en cuenta el efecto de los muelles de centrado y el rozamiento de la placa alineadora, hasta ahora no desarrollado en la literatura científica.

Se ha propuesto un método para distinguir entre la contribución de los ángulos de convergencia y de caída por separado en la medida de vehículo completo, necesitando para ello realizarla marcha adelante y marcha atrás. Para obtener una mayor precisión, se requiere el ensayo de los neumáticos desmontados, descontando así la contribución de la conicidad y el guiado de capas.

Por último, se ha estudiado la relación entre la medida mediante placa alineadora y placa dinamométrica, aspecto hasta el momento inexplorado en la literatura científica. Se han señalado las diferencias existentes entre ambas, y se ha obtenido un método para estimar la fuerza lateral desarrollada entre neumático y suelo rígido a partir de la medida en placa alineadora, lo cual ha permitido desarrollar la Propuesta II de criterio de inspección.

En definitiva, se podría afirmar que al término de este trabajo han sido cubiertos los objetivos planteados para la tesis.

8.2 Desarrollos futuros

A lo largo del desarrollo de esta tesis se han identificado posibles vías de continuación de la investigación emprendida, una vez alcanzados los objetivos planteados. A continuación, se exponen algunas de las más destacables.

Sería conveniente realizar ensayos experimentales sobre un vehículo de competición, sin elementos elásticos en el sistema de suspensión, lo cual permitiría unos intervalos de variación del ajuste del ángulo de convergencia inferiores a los $0,5^\circ$ fijados en este trabajo. El hecho de utilizar este tipo de vehículos posibilitaría asimismo la variación del ángulo de caída experimentalmente y, por consiguiente, su estudio. En caso de poder ajustar también la alineación del eje trasero se podría comprobar su influencia sobre la medida de desviación lateral en el delantero.

Se podría reducir la variabilidad del ensayo, pudiendo ajustar con mayor precisión los ángulos de convergencia y caída, mediante el diseño de una maqueta de un cuarto de vehículo, como la de la Figura 8.2. Este tipo de dispositivo permitiría manejar las variables del ensayo de manera más controlada que mediante el uso de un vehículo completo. Esta estructura se montaría sobre un sistema deslizante que le permitiese pasar rodando de manera similar a como lo haría un vehículo sobre las placas de medida.

Una forma de estudiar con mayor precisión la relación existente entre las fuerzas desarrolladas en las placas alineadora y dinamométrica sería mediante la utilización de una llanta dinamométrica montada en la rueda sobre la que se efectuara la medida con ambas placas.

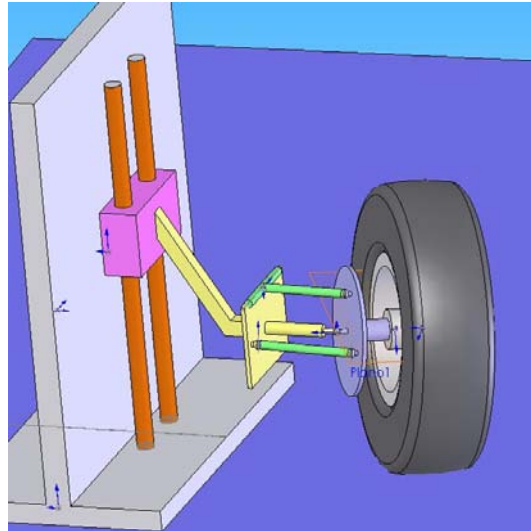


Figura 8.2 Posible diseño de maqueta de ensayos

Con el objetivo de comprobar la influencia de aquellos factores que no ha sido posible experimentar en los ensayos, como el ángulo de caída, o comprobar la influencia de otros factores en un rango de variación mayor al posible de obtener experimentalmente (ángulo de convergencia, velocidad de paso, etc.), sería útil desarrollar un modelo de simulación apropiado.

De cara a cuantificar con precisión la influencia de las características del neumático de conicidad y guiado de capas, sería interesante contar con un banco de ensayos de neumático desmontado, para poder distinguir este efecto del producido por convergencia y caída una vez montados los neumáticos en el vehículo.

Como ya se ha apuntado, una posibilidad de mejora del Criterio II consistiría en redefinir los límites de adherencia lateral para la calificación de defecto, de manera que se ajusten mejor a las características de alineación del parque de automóviles. Así, estos límites deberían dejar de ser simétricos respecto al cero para pasar a resultar igual de permisivos con los vehículos cuyo ángulo de convergencia recomendado es positivo y con aquellos en los que este es negativo.

A pesar de que la validación de los criterios se ha realizado mediante el ensayo de un elevado número de vehículos, estos han sido solicitados expresamente para las pruebas; no son vehículos de los que acuden libremente a realizar la ITV, por lo que puede que no sean perfectamente representativos del parque. Por lo tanto, sería recomendable realizar la validación de los criterios, especialmente del Criterio III, que ha sido el finalmente elegido, mediante un programa a mayor escala en una ITV real.

En general, cualquier desarrollo que permita identificar con mayor eficacia en la ITV posibles riesgos para la circulación derivados del sistema de dirección, tendría un gran valor de cara a la mejora de la seguridad vial.

Anexos

Anexo I: Sistema de referencia SAE

Las siguientes definiciones, relativas a la geometría de las ruedas, se han basado en las convenciones de la SAE (Society of Automotive Engineers) (SAE, 1976), que sitúa el origen del sistema de referencia en el centro de la huella de contacto (ver Figura A.1).

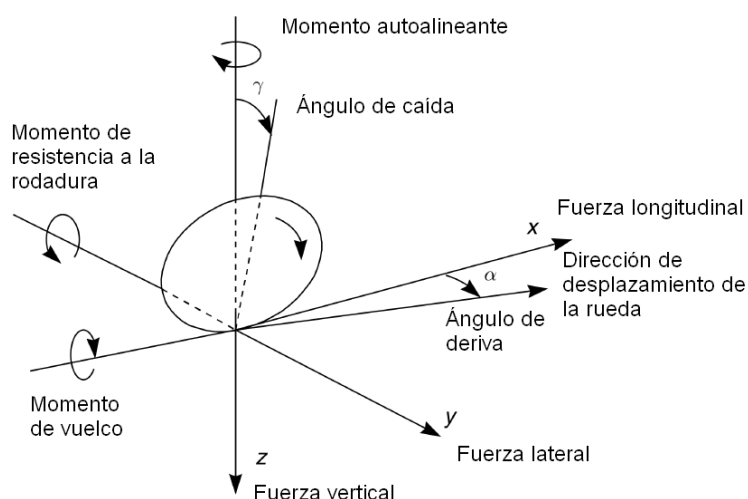


Figura A.1 Sistema de referencia SAE

Eje X: Es la intersección del plano medio de la rueda y el plano de la superficie de rodadura. El sentido positivo coincide con el de avance del vehículo.

Eje Z: Es perpendicular al plano de la superficie de rodadura y su sentido positivo coincide con el de penetración en el suelo.

Eje Y: Es perpendicular a los anteriores y debe formar con ellos un sistema ortogonal orientado a derechas.

Eje de la mangueta: es el eje de rotación de la rueda.

Eje pivote (en inglés *kingpin*): Es el eje (físico o ficticio) alrededor del cual gira la mangueta para cambiar de dirección la rueda.

Plano de la rueda: Plano medio del neumático perpendicular a su eje de rotación.

Centro de la rueda: Punto de intersección entre el eje de rotación y el plano de la rueda.

Centro de la superficie de contacto: Punto de intersección del plano de la rueda y la proyección de su eje de rotación sobre el plano de rodadura.

Radio de rodadura: Es la distancia entre la traza del eje pivote sobre el plano de apoyo y la traza sobre el mismo plano del plano medio de la rueda.

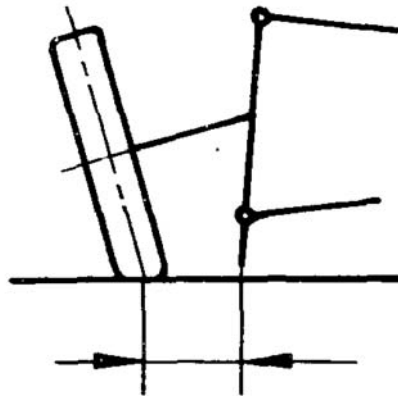


Figura A.2 Radio de rodadura (AENOR, 1987)

Fuerza longitudinal (de tracción o frenado) F_x : Componente respecto al eje X de la fuerza que actúa sobre el neumático, como consecuencia de su interacción con el suelo.

Fuerza lateral F_y . Componente en la dirección del eje Y de la fuerza que actúa sobre el neumático, como consecuencia de su interacción con el suelo.

Fuerza normal F_z : Componente en la dirección del eje Z de la fuerza que actúa sobre el neumático, como consecuencia de su interacción con el suelo.

Momento autoalineante M_z : Momento, respecto al eje Z, de las fuerzas de contacto que actúan sobre el neumático.

Momento de resistencia a la rodadura M_y : Momento respecto al eje Y de las fuerzas de contacto que actúan sobre el neumático.

Anexo II: Datos obtenidos en los ensayos experimentales

Tabla A-1 Ensayos de validación de la Propuesta I de criterio de inspección

Ensayo	α medido (°)	Desviación lateral (m/km)	α estimado (°)	α recomend. (°)	Tolerancia recomend. (°)	Dictamen según α estimado	Dictamen según α medido (Referencia)
1	0,02	-2,36	-0,07	0,00	0,15	OK	OK
2	0,25	-3,47	-0,16	-0,23	0,13	OK	D.G.
3	0,16	-0,75	0,06	-0,17	0,17	OK	D.G.
4	-0,27	-3,27	-0,14	-0,17	0,17	OK	OK
5	0,00	0,35	0,15	-0,17	0,17	D.L.	OK
6	0,66	4,66	0,49	0,17	0,17	D.L.	D.G.
7	0,25	-0,57	0,07	-0,23	0,17	D.L.	D.G.
8	-0,27	-5,57	-0,33	0,17	0,17	D.G.	D.G.
9	-0,21	-4,13	-0,21	-0,23	0,23	OK	OK
10	0,00	-4,56	-0,24	0,00	0,15	D.L.	OK
11	0,08	-0,83	0,05	-0,23	0,23	OK	D.L.
12	0,50	5,69	0,58	-0,23	0,17	D.G.	D.G.
13	-1,18	-16,99	-1,24	-0,17	0,17	D.G.	D.G.
14	-0,08	-2,00	-0,04	0,00	0,17	OK	OK
15	-0,43	-7,73	-0,50	0,00	0,20	D.L.	D.G.
16	0,10	2,05	0,28	0,12	0,17	OK	OK
17	-0,42	-6,67	-0,41	-0,33	0,25	OK	OK
18	0,10	1,00	0,20	-0,17	0,17	D.L.	D.G.
19	0,75	4,03	0,44	-0,23	0,17	D.G.	D.G.
20	0,15	0,25	0,14	0,20	0,15	OK	OK
21	-0,28	-2,85	-0,11	-0,17	0,17	OK	OK
22	-0,10	0,26	0,14	0,00	0,17	OK	OK
23	-0,90	-13,11	-0,93	0,00	0,17	D.G.	D.G.
24	-0,36	-7,57	-0,49	0,30	0,40	D.L.	D.G.
25	0,71	9,14	0,85	0,00	0,17	D.G.	D.G.
26	-0,05	-4,29	-0,22	-0,17	0,17	OK	OK
27	1,00	10,07	0,92	-0,23	0,17	D.G.	D.G.
28	0,03	-5,63	-0,33	-0,17	0,17	OK	D.L.
29	-0,50	-2,58	-0,09	-0,17	0,17	OK	D.G.
30	0,93	7,69	0,74	0,00	0,15	D.G.	D.G.
31	-0,02	-3,20	-0,14	-0,17	0,17	OK	OK
32	0,40	3,24	0,38	0,00	0,17	D.L.	D.G.
33	0,93	11,97	1,08	-0,23	0,17	D.G.	D.G.
34	0,26	2,45	0,32	-0,25	0,17	D.G.	D.G.
35	-0,14	-5,98	-0,36	0,00	0,17	D.L.	OK
36	0,38	-0,20	0,10	0,00	0,17	OK	D.G.
37	-0,05	-2,33	-0,07	-0,17	0,17	OK	OK
38	-0,25	-4,13	-0,21	-0,23	0,17	OK	OK

Ensayo	α medido (°)	Desviación lateral (m/km)	α estimado (°)	α recomend. (°)	Tolerancia recomend. (°)	Dictamen según α estimado	Dictamen según α medido (Referencia)
39	0,27	4,11	0,45	-0,23	0,17	D.G.	D.G.
40	-0,23	-4,83	-0,27	-0,32	0,17	OK	OK
41	0,15	0,88	0,19	-0,17	0,17	D.L.	D.G.
42	1,00	12,14	1,09	0,30	0,40	D.L.	D.G.
43	0,00	-2,23	-0,06	0,30	0,40	OK	OK
44	0,05	-1,36	0,01	0,12	0,17	OK	OK
45	1,81	20,03	1,72	-0,23	0,17	D.G.	D.G.
46	0,64	4,12	0,45	-0,25	0,17	D.G.	D.G.
47	-0,75	-11,44	-0,80	0,23	0,13	D.G.	D.G.
48	-0,70	-9,20	-0,62	-0,20	0,21	D.L.	D.G.
49	0,33	3,44	0,39	0,17	0,17	OK	OK
50	0,15	0,49	0,16	0,00	0,17	OK	OK
51	-0,23	-2,46	-0,08	-0,17	0,17	OK	OK
52	-0,20	-2,65	-0,09	0,00	0,17	OK	D.L.
53	0,15	-4,23	-0,22	-0,17	0,17	OK	D.G.
54	0,94	11,13	1,01	0,33	0,17	D.G.	D.G.
55	0,60	6,44	0,63	-0,17	0,17	D.G.	D.G.
56	0,08	-0,28	0,10	0,00	0,17	OK	OK
57	0,49	2,26	0,30	0,30	0,17	OK	D.L.
58	-0,50	-8,58	-0,57	-0,23	0,17	D.L.	D.G.
59	-1,00	-14,82	-1,07	-0,23	0,17	D.G.	D.G.
60	0,03	0,37	0,15	0,00	0,17	OK	OK
61	0,13	0,52	0,16	-0,17	0,17	D.L.	D.G.
62	0,07	-0,17	0,11	0,00	0,15	OK	OK
63	-0,27	-5,52	-0,32	-0,23	0,17	OK	OK
64	-0,30	-8,11	-0,53	0,22	0,30	D.L.	D.G.
65	1,50	17,63	1,53	0,00	0,33	D.G.	D.G.
66	-0,32	-4,05	-0,20	0,10	0,10	D.L.	D.G.
67	-0,75	-13,09	-0,93	-0,23	0,17	D.G.	D.G.
68	0,12	-1,06	0,04	0,00	0,33	OK	OK
69	-0,26	-3,36	-0,15	-0,17	0,17	OK	OK
70	0,49	1,77	0,26	0,30	0,17	OK	D.L.
71	0,15	0,94	0,20	0,10	0,17	OK	OK
72	-0,01	-3,73	-0,18	-0,20	0,20	OK	OK
73	0,11	-0,98	0,04	-0,17	0,25	OK	D.L.
74	0,49	2,84	0,35	0,30	0,20	OK	OK
75	0,20	-2,00	-0,04	-0,17	0,17	OK	D.G.
76	-0,17	-5,63	-0,33	-0,23	0,13	OK	OK
77	-0,25	-3,56	-0,16	-0,17	0,17	OK	OK
78	0,45	2,45	0,32	0,30	0,17	OK	OK
79	-0,22	-4,20	-0,22	-0,30	0,15	OK	OK
80	-0,40	-9,71	-0,66	0,10	0,20	D.G.	D.G.
81	0,00	-3,66	-0,17	-0,23	0,17	OK	D.L.
82	-0,19	-3,19	-0,14	-0,17	0,17	OK	OK
83	0,67	4,01	0,44	0,17	0,17	D.L.	D.G.
84	-0,05	-2,72	-0,10	0,00	0,13	OK	OK
85	0,51	3,38	0,39	0,17	0,17	OK	D.G.
86	0,25	-2,87	-0,11	0,00	0,17	OK	D.L.
87	0,50	2,80	0,34	0,30	0,40	OK	OK

Ensayo	α medido (°)	Desviación lateral (m/km)	α estimado (°)	α recomend. (°)	Tolerancia recomend. (°)	Dictamen según α estimado	Dictamen según α medido (Referencia)
88	0,04	-2,95	-0,12	0,00	0,15	OK	OK
89	0,17	-4,56	-0,24	-0,15	0,15	OK	D.G.
90	-0,43	-3,66	-0,17	-0,30	0,17	OK	OK
91	0,21	1,80	0,26	0,00	0,17	D.L.	D.L.
92	0,70	5,29	0,54	0,33	0,07	OK	D.G.
93	-0,27	-2,46	-0,08	-0,30	0,15	OK	OK

Tabla A-2 Ensayos de validación de la Propuesta II de criterio de inspección

Ensayo	μy medida	Desviación lateral medida (m/km)	Fy estimada (N)	μy estimada	Dictamen según μy medida	Dictamen según μy estimada	Dictamen según Referencia
1	-0,04	-2,36	-26	-0,01	OK	OK	OK
2	-0,03	-3,47	-67	-0,02	OK	OK	D.G.
3	0,01	-0,75	32	0,01	OK	OK	D.G.
4	-0,02	-3,27	-60	-0,02	OK	OK	OK
5	0,02	0,35	72	0,02	OK	OK	OK
6	0,06	4,66	230	0,06	OK	OK	D.G.
7	0,01	-0,57	39	0,01	OK	OK	D.G.
8	-0,03	-5,57	-143	-0,03	OK	OK	D.G.
9	-0,02	-4,13	-91	-0,02	OK	OK	OK
10	-0,03	-4,56	-107	-0,03	OK	OK	OK
11	0,01	-0,83	29	0,01	OK	OK	D.L.
12	0,09	5,69	267	0,07	OK	OK	D.G.
13	-0,17	-16,99	-559	-0,19	D.G.	D.G.	D.G.
14	-0,02	-2,00	-13	0,00	OK	OK	OK
15	-0,07	-7,73	-222	-0,07	OK	OK	D.G.
16	0,06	2,05	134	0,03	OK	OK	OK
17	-0,07	-6,67	-183	-0,06	OK	OK	OK
18	0,02	1,00	96	0,02	OK	OK	D.G.
19	0,06	4,03	206	0,05	OK	OK	D.G.
20	0,02	0,25	69	0,02	OK	OK	OK
21	-0,01	-2,85	-44	-0,01	OK	OK	OK
22	0,01	0,26	69	0,02	OK	OK	OK
23	-0,12	-13,11	-418	-0,11	D.L.	D.L.	D.G.
24	-0,08	-7,57	-216	-0,07	OK	OK	D.G.
25	0,10	9,14	393	0,10	OK	OK	D.G.
26	-0,02	-4,29	-97	-0,02	OK	OK	OK
27	0,13	10,07	427	0,11	D.L.	D.L.	D.G.
28	-0,04	-5,63	-145	-0,04	OK	OK	D.L.
29	-0,01	-2,58	-34	-0,01	OK	OK	D.G.
30	0,10	7,69	340	0,10	OK	OK	D.G.
31	-0,01	-3,20	-57	-0,01	OK	OK	OK
32	0,07	3,24	178	0,07	OK	OK	D.G.
33	0,08	11,97	496	0,12	OK	D.L.	D.G.
34	0,05	2,45	149	0,05	OK	OK	D.G.
35	-0,06	-5,98	-158	-0,06	OK	OK	OK
36	0,02	-0,20	53	0,02	OK	OK	D.G.
37	0,00	-2,33	-25	-0,01	OK	OK	OK
38	-0,05	-4,13	-91	-0,02	OK	OK	OK
39	0,04	4,11	209	0,06	OK	OK	D.G.
40	-0,03	-4,83	-116	-0,03	OK	OK	OK
41	0,02	0,88	92	0,02	OK	OK	D.G.
42	0,19	12,14	502	0,16	D.G.	D.G.	D.G.
43	-0,05	-2,23	-21	-0,01	OK	OK	OK
44	0,00	-1,36	10	0,01	OK	OK	OK
45	0,20	20,03	790	0,20	D.G.	D.G.	D.G.
46	0,06	4,12	210	0,06	OK	OK	D.G.
47	-0,12	-11,44	-357	-0,11	D.L.	D.L.	D.G.
48	-0,11	-9,20	-276	-0,11	D.L.	D.L.	D.G.

Ensayo	μy medida	Desviación lateral medida (m/km)	Fy estimada (N)	μy estimada	Dictamen según μy medida	Dictamen según μy estimada	Dictamen según Referencia
49	0,05	3,44	185	0,05	OK	OK	OK
50	0,02	0,49	77	0,02	OK	OK	OK
51	-0,02	-2,46	-30	-0,01	OK	OK	OK
52	-0,01	-2,65	-37	-0,01	OK	OK	D.L.
53	-0,03	-4,23	-95	-0,03	OK	OK	D.G.
54	0,08	11,13	465	0,08	OK	OK	D.G.
55	0,10	6,44	294	0,10	OK	OK	D.G.
56	0,01	-0,28	50	0,01	OK	OK	OK
57	0,04	2,26	142	0,04	OK	OK	D.L.
58	-0,08	-8,58	-253	-0,06	OK	OK	D.G.
59	-0,13	-14,82	-480	-0,12	D.L.	D.L.	D.G.
60	0,01	0,37	73	0,01	OK	OK	OK
61	0,03	0,52	79	0,03	OK	OK	D.G.
62	0,01	-0,17	53	0,01	OK	OK	OK
63	-0,04	-5,52	-141	-0,03	OK	OK	OK
64	-0,08	-8,11	-236	-0,08	OK	OK	D.G.
65	0,16	17,63	702	0,16	D.G.	D.G.	D.G.
66	-0,02	-4,05	-88	-0,02	OK	OK	D.G.
67	-0,11	-13,09	-417	-0,11	D.L.	D.L.	D.G.
68	-0,01	-1,06	21	0,01	OK	OK	OK
69	-0,03	-3,36	-63	-0,01	OK	OK	OK
70	0,03	1,77	124	0,03	OK	OK	D.L.
71	0,01	0,94	94	0,02	OK	OK	OK
72	-0,02	-3,73	-76	-0,02	OK	OK	OK
73	0,01	-0,98	24	0,01	OK	OK	D.L.
74	0,06	2,84	163	0,04	OK	OK	OK
75	0,00	-2,00	-13	0,00	OK	OK	D.G.
76	-0,04	-5,63	-145	-0,04	OK	OK	OK
77	-0,01	-3,56	-70	-0,01	OK	OK	OK
78	0,05	2,45	149	0,05	OK	OK	OK
79	-0,05	-4,20	-93	-0,03	OK	OK	OK
80	-0,09	-9,71	-294	-0,08	OK	OK	D.G.
81	-0,03	-3,66	-74	-0,02	OK	OK	D.L.
82	-0,02	-3,19	-57	-0,02	OK	OK	OK
83	0,06	4,01	206	0,06	OK	OK	D.G.
84	-0,01	-2,72	-40	-0,01	OK	OK	OK
85	0,04	3,38	183	0,04	OK	OK	D.G.
86	-0,01	-2,87	-45	-0,01	OK	OK	D.L.
87	0,07	2,80	162	0,05	OK	OK	OK
88	-0,02	-2,95	-48	-0,02	OK	OK	OK
89	-0,03	-4,56	-107	-0,03	OK	OK	D.G.
90	-0,04	-3,66	-74	-0,02	OK	OK	OK
91	0,03	1,80	125	0,03	OK	OK	D.L.
92	0,05	5,29	253	0,05	OK	OK	D.G.
93	-0,01	-2,46	-30	-0,01	OK	OK	OK

Tabla A-3 Ensayos de validación de la Propuesta III de criterio de inspección

Ensayo	Desviación lateral, Dl (m/km)	Dictamen según Dl	Dictamen según Referencia
1	-2,36	OK	OK
2	-3,47	OK	D.G.
3	-0,75	OK	D.G.
4	-3,27	OK	OK
5	0,35	OK	OK
6	4,66	OK	D.G.
7	-0,57	OK	D.G.
8	-5,57	OK	D.G.
9	-4,13	OK	OK
10	-4,56	OK	OK
11	-0,83	OK	D.L.
12	5,69	OK	D.G.
13	-16,99	D.G.	D.G.
14	-2,00	OK	OK
15	-7,73	OK	D.G.
16	2,05	OK	OK
17	-6,67	OK	OK
18	1,00	OK	D.G.
19	4,03	OK	D.G.
20	0,25	OK	OK
21	-2,85	OK	OK
22	0,26	OK	OK
23	-13,11	D.G.	D.G.
24	-7,57	OK	D.G.
25	9,14	OK	D.G.
26	-4,29	OK	OK
27	10,07	OK	D.G.
28	-5,63	OK	D.L.
29	-2,58	OK	D.G.
30	7,69	OK	D.G.
31	-3,20	OK	OK
32	3,24	OK	D.G.
33	11,97	OK	D.G.
34	2,45	OK	D.G.
35	-5,98	OK	OK
36	-0,20	OK	D.G.
37	-2,33	OK	OK
38	-4,13	OK	OK
39	4,11	OK	D.G.
40	-4,83	OK	OK
41	0,88	OK	D.G.
42	12,14	D.L.	D.G.

Ensayo	Desviación lateral, Dl (m/km)	Dictamen según Dl	Dictamen según Referencia
43	-2,23	OK	OK
44	-1,36	OK	OK
45	20,03	D.G.	D.G.
46	4,12	OK	D.G.
47	-11,44	D.G.	D.G.
48	-9,20	D.L.	D.G.
49	3,44	OK	OK
50	0,49	OK	OK
51	-2,46	OK	OK
52	-2,65	OK	D.L.
53	-4,23	OK	D.G.
54	11,13	OK	D.G.
55	6,44	OK	D.G.
56	-0,28	OK	OK
57	2,26	OK	D.L.
58	-8,58	D.L.	D.G.
59	-14,82	D.G.	D.G.
60	0,37	OK	OK
61	0,52	OK	D.G.
62	-0,17	OK	OK
63	-5,52	OK	OK
64	-8,11	D.L.	D.G.
65	17,63	D.G.	D.G.
66	-4,05	OK	D.G.
67	-13,09	D.G.	D.G.
68	-1,06	OK	OK
69	-3,36	OK	OK
70	1,77	OK	D.L.
71	0,94	OK	OK
72	-3,73	OK	OK
73	-0,98	OK	D.L.
74	2,84	OK	OK
75	-2,00	OK	D.G.
76	-5,63	OK	OK
77	-3,56	OK	OK
78	2,45	OK	OK
79	-4,20	OK	OK
80	-9,71	D.L.	D.G.
81	-3,66	OK	D.L.
82	-3,19	OK	OK
83	4,01	OK	D.G.
84	-2,72	OK	OK
85	3,38	OK	D.G.
86	-2,87	OK	D.L.

Ensayo	Desviación lateral, Dl (m/km)	Dictamen según Dl	Dictamen según Referencia
87	2,80	OK	OK
88	-2,95	OK	OK
89	-4,56	OK	D.G.
90	-3,66	OK	OK
91	1,80	OK	D.L.
92	5,29	OK	D.G.
93	-2,46	OK	OK

Tabla A-4 Comparativa de los ensayos de validación según las tres propuestas realizadas

Ensayo	Dictamen según Crit. I	Dictamen según Crit. II	Dictamen según Crit. III	Dictamen según Referencia
1	OK	OK	OK	OK
2	OK	OK	OK	D.G.
3	OK	OK	OK	D.G.
4	OK	OK	OK	OK
5	D.L.	OK	OK	OK
6	D.L.	OK	OK	D.G.
7	D.L.	OK	OK	D.G.
8	D.G.	OK	OK	D.G.
9	OK	OK	OK	OK
10	D.L.	OK	OK	OK
11	OK	OK	OK	D.L.
12	D.G.	OK	OK	D.G.
13	D.G.	D.G.	D.G.	D.G.
14	OK	OK	OK	OK
15	D.L.	OK	OK	D.G.
16	OK	OK	OK	OK
17	OK	OK	OK	OK
18	D.L.	OK	OK	D.G.
19	D.G.	OK	OK	D.G.
20	OK	OK	OK	OK
21	OK	OK	OK	OK
22	OK	OK	OK	OK
23	D.G.	D.L.	D.G.	D.G.
24	D.L.	OK	OK	D.G.
25	D.G.	OK	OK	D.G.
26	OK	OK	OK	OK
27	D.G.	D.L.	OK	D.G.
28	OK	OK	OK	D.L.
29	OK	OK	OK	D.G.
30	D.G.	OK	OK	D.G.
31	OK	OK	OK	OK
32	D.L.	OK	OK	D.G.
33	D.G.	D.L.	OK	D.G.
34	D.G.	OK	OK	D.G.
35	D.L.	OK	OK	OK
36	OK	OK	OK	D.G.
37	OK	OK	OK	OK
38	OK	OK	OK	OK
39	D.G.	OK	OK	D.G.
40	OK	OK	OK	OK
41	D.L.	OK	OK	D.G.
42	D.L.	D.G.	D.L.	D.G.
43	OK	OK	OK	OK

Ensayo	Dictamen según Crit. I	Dictamen según Crit. II	Dictamen según Crit. III	Dictamen según Referencia
44	OK	OK	OK	OK
45	D.G.	D.G.	D.G.	D.G.
46	D.G.	OK	OK	D.G.
47	D.G.	D.L.	D.G.	D.G.
48	D.L.	D.L.	D.L.	D.G.
49	OK	OK	OK	OK
50	OK	OK	OK	OK
51	OK	OK	OK	OK
52	OK	OK	OK	D.L.
53	OK	OK	OK	D.G.
54	D.G.	OK	OK	D.G.
55	D.G.	OK	OK	D.G.
56	OK	OK	OK	OK
57	OK	OK	OK	D.L.
58	D.L.	OK	D.L.	D.G.
59	D.G.	D.L.	D.G.	D.G.
60	OK	OK	OK	OK
61	D.L.	OK	OK	D.G.
62	OK	OK	OK	OK
63	OK	OK	OK	OK
64	D.L.	OK	D.L.	D.G.
65	D.G.	D.G.	D.G.	D.G.
66	D.L.	OK	OK	D.G.
67	D.G.	D.L.	D.G.	D.G.
68	OK	OK	OK	OK
69	OK	OK	OK	OK
70	OK	OK	OK	D.L.
71	OK	OK	OK	OK
72	OK	OK	OK	OK
73	OK	OK	OK	D.L.
74	OK	OK	OK	OK
75	OK	OK	OK	D.G.
76	OK	OK	OK	OK
77	OK	OK	OK	OK
78	OK	OK	OK	OK
79	OK	OK	OK	OK
80	D.G.	OK	D.L.	D.G.
81	OK	OK	OK	D.L.
82	OK	OK	OK	OK
83	D.L.	OK	OK	D.G.
84	OK	OK	OK	OK
85	OK	OK	OK	D.G.
86	OK	OK	OK	D.L.
87	OK	OK	OK	OK

Ensayo	Dictamen según Crit. I	Dictamen según Crit. II	Dictamen según Crit. III	Dictamen según Referencia
88	OK	OK	OK	OK
89	OK	OK	OK	D.G.
90	OK	OK	OK	OK
91	D.L.	OK	OK	D.L.
92	OK	OK	OK	D.G.
93	OK	OK	OK	OK

Bibliografía

A continuación se recoge la bibliografía consultada para la realización de esta tesis.

Adams, H. 1993, *Chassis Engineering*, HP Books, EEUU.

AENOR 1987, *Norma Española UNE 26192:87. Vehículos automóviles. Dimensiones de los automóviles y vehículos remolcados. Denominaciones y definiciones*, Madrid.

Aparicio, F., Vera, C. & Díaz, V. 1995, *Teoría de los vehículos automóviles*, Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid.

Arias-Paz, M. 1999, *Manual de automóviles*, 53^a edn, CIE Inversiones Editoriales Dossat 2000, Madrid.

Autodata 2005, *Alineación de ruedas 2005 : control, ajuste, ruedas delanteras y traseras*, Autodata, Reino Unido.

Bastow, D., Howard, G. & Whitehead, J.P. 2004, *Car Suspension and Handling*, 4th edn, Society of Automotive Engineers, Reino Unido.

Blundell, M. & Harty, D. 2004a, "Simulation output and interpretation" in *The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics* Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 395-440.

- Blundell, M. & Harty, D. 2004b, "Tyre characteristics and modelling" in *The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics* Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 248-325.
- C.I.T.A. 1996, *Recommendation N° 1: Inspection of Motor Vehicles. Items to be inspected in testing stations*, Comité International de l'Inspection Technique Automobile, Bélgica.
- Cebon, D. 1999, *Handbook of vehicle-road interaction*, Swets & Zeitlinger, Holanda.
- CEPE/ONU 1958, *Accord concernant l'Adoption de conditions uniformes d'homologation et la reconnaissance réciproque de l'homologation des équipements et pièces de véhicules à moteur*, Rev.2, 10/10/1995 edn, United Nations, Economic Commission For Europe, Ginebra.
- CEPE/ONU 1997, *Accord concernant l'adoption de Conditions Uniformes Applicables au Contrôle Technique Périodique des Véhicules à Roues et la Reconnaissance Réciproque des Contrôles*, United Nations, Economic Commission For Europe, Viena.
- CEPE/ONU 1998a, *Accord concernant l'établissement de règlements techniques mondiaux applicables aux véhicules à roues, ainsi qu'aux équipements et pièces qui peuvent être montés et/ou utilisés sur les véhicules à roues*, United Nations, Economic Commission For Europe, Ginebra.
- CEPE/ONU 1998b, *Consolidated Resolution On Road Traffic (R.E.1.), Revision 5, Annex 2. Periodic inspection of vehicles - Checks to be carried out (recommendation 2.6.). List of items to be inspected*, United Nations, Economic Commission For Europe, Ginebra.
- Christensen, P. & Elvik, R. 2007, "Effects on accidents of periodic motor vehicle inspection in Norway", *Accident; Analysis and Prevention*, vol. 39, no. 1, pp. 47-52.
- Colarelli, N.J. & Marting, P.G. 1992, *Stand-alone automotive side-slip meter - with switches on measurement plates actuated by passage of vehicle tyres and operating display located adjacent.*, United States Patent and Trademark Office, EEUU.
- Comisión Europea 2001, *Libro Blanco. La política europea de transportes de cara al 2010: la hora de la verdad*, Bruselas.
- Consejo Europeo 1996, *Directiva 96/96/CE del Consejo de 20 de diciembre de 1996 sobre la aproximación de las legislaciones de los Estados Miembros relativas a la inspección técnica de los vehículos a motor y de sus remolques*, Directiva europea edn, Bruselas.

- de Juan, A., Sancibrián, R., García, P., et al 2008, "Diseño de mecanismos de dirección de vehículos mediante un método de síntesis óptima dimensional", *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Anales de Ingeniería Mecánica vol.1*, Gijón, pp. 93.
- Descamps, D. 2003, "Géométrie des roues", *L'Argus de l'Automobile, Francia*, .
- Díaz, V., García-Pozuelo, D., Boada, M.J.L., et al 2008, "Steering inspection by means of tyre force measure", *Diagnostyka*, vol. 47, no. 3, pp. 47-54.
- Díaz, V., San Román, J.L., Gauchía, A., et al 2007, *Contribución de la Inspección Técnica de vehículos (ITV) a la Seguridad Vial*, Instituto de Seguridad de los Vehículos Automóviles Duque de Santomauro (ISVA). Universidad Carlos III de Madrid, Madrid.
- Dixon, J.C. 1996, *Tires, Suspension, and Handling*, Society of Automotive Engineers, EEUU.
- Europa Press 2008, *Las ITV rechazan uno de cada cinco vehículos en la primera inspección*.
- European co-operation for Accreditation 1999, "Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. EA-4/02", .
- FESVIAL 2009, *Neumáticos y Seguridad: Accidentes de Tráfico en España relacionados con los neumáticos*, Fundación Española para la Seguridad Vial; Michelin, Madrid.
- Focus - 1, S.r.l. 2000, *Manual de instrucciones. Alineador de direcciones DWA*.
- Fosser, S. 1992, "An Experimental Evaluation of the Effects of Periodic Motor-Vehicle Inspection on Accident Rates", *Accident Analysis and Prevention*, vol. 24, no. 6, pp. 599-612.
- G.A.O. 1990, *Motor Vehicle Safety: NHTSA Should Resume Its Support of State Periodic Inspection Programs*, U.S. General Accounting Office, EEUU.
- García-Pozuelo, D. 2008, *Modelo de contacto neumático-calzada a baja velocidad*, Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid.
- García-Pozuelo, D., Calvo, J.A., Gauchía, A., et al 2007, "Measurement of lateral tire force as vehicle inspection instrument", *12th IFToMM World Congress*, Francia.
- García-Pozuelo, D., Díaz, V. & Boada, M.J.L. 2009, "A contact model between tyre and pavement at low speed for periodic motor vehicle inspection",

Proceedings of the ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress Exposition IMECE 2009, ASME, EEUU.

García-Pozuelo, D., Díaz, V. & Boada, M.J.L. 2010, "Methodology to test the steering system of an automobile by means of forces measurement", *FISITA 2010 World Automotive Congress*, FISITA, Hungría.

Gillespie, T.D. 1992, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, EEUU.

Gobierno de Canarias 2007, *DECRETO 93/2007, de 8 de mayo, por el que se establece el régimen de autorización administrativa para la prestación del Servicio de Inspección Técnica de Vehículos en la Comunidad Autónoma de Canarias y por el que se aprueba el Reglamento de instalación y funcionamiento de las Estaciones de Inspección Técnica de Vehículos.*, Consejería de Industria, Comercio y Nuevas Tecnologías, BOC Nº 100 (18 de Mayo de 2007).

Habibi, H., Shirazi, K.H. & Shishesaz, M. 2008, "Roll steer minimization of McPherson-strut suspension system using genetic algorithm method", *Mechanism & Machine Theory*, vol. 43, no. 1, pp. 57-67.

Halderman, J.D. 2000, *Automotive chassis systems*, 2nd edn, Prentice Hall, EEUU.

Hall, W., Mottram, J.T., Dennehy, D.J., et al 2003, "Characterisation of the contact patch behaviour of an automobile tyre by physical testing", *International Journal of Vehicle Design*, vol. 31, no. 3, pp. 354-376.

Haney, P. 2003, *The racing and high-performance tire*, Society of Automotive Engineers, EEUU.

Heisler, H. 2002, "Tyres" in *Advanced Vehicle Technology (Second Edition)* Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 270-310.

Holdmann, P., Philip, K. & Bertram, M. 1998, "Suspension kinematics and compliance-measuring and simulation", *SAE paper*, vol. 980897.

Hunter Co. 1990, *The sideslip measurement: an indication of tire wear potential*, Hunter Engineering Company, EEUU.

Johnson, E. 1996, *Tires and Handling*, SAE International.

King-Hele, D. 2002, "Erasmus Darwin's Improved Design for Steering Carriages--And Cars", *Notes and Records of the Royal Society of London*, vol. 56, no. 1, pp. 41-62.

Klaps, J. & Day, A.J. 2005, "Steering drift and wheel movement during braking: static and dynamic measurements", *Proceedings of the Institution of*

- Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 219, no. 1, pp. 11-19.
- Kolke, R. 2002, *Inspection & Maintenance and Roadworthiness*, GTZ GmbH (Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit), Alemania.
- Mántaras, D.A., Luque, P. & Vera, C. 2004, "Development and validation of a three-dimensional kinematic model for the McPherson steering and suspension mechanisms", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 39, no. 6, pp. 603-619.
- Martin, J.L. & Laumon, B. 2005, "Tire blow-outs and motorway accidents.", *Traffic injury prevention*, vol. 6, no. 1, pp. 53.
- Milliken, W.F. & Milliken, D.L. 1995, *Race car vehicle dynamics*, Society of Automotive Engineers, EEUU.
- Milliken, W.F., Milliken, D.L. & Olley, M. 2002, *Chassis Design: Principles and Analysis*, Society of Automotive Engineers, EEUU.
- MITYC-ITV 2009, *Manual de Procedimiento de Inspección de las estaciones I.T.V.* Revisión 6ª edn, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid.
- Modak, J.P., Belkhode, P.N., Bodhankar, D., et al 2008, "Modeling and analysis of front suspension for improving vehicle ride and handling", *2008 1st International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET)*, IEEE, EEUU.
- Mori, K. 1996, "Vehicle cornering characteristics in acceleration and braking through attitude control of front and rear tires", *JSME International Journal, Series C (Dynamics, Control, Robotics, Design and Manufacturing)*, vol. 39, no. 1, pp. 58-66.
- Muñoz, B. 2001, *Modelo de comportamiento de placa alineadora*, Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid.
- Musselman, H.E. 1934, *Wheel alignment testing device*, United States Patent and Trademark Office, EEUU.
- Nozaki, H. 2006, "Technique of separate measuring side slip for toe angle and camber angle", *International journal of automotive technology*, vol. 7, no. 6, pp. 681-686.
- O.M.S. 2011, *Decade of Action for Road Safety 2011–2020 Saving millions of lives*, Organización Mundial de la Salud, Ginebra.
- ONU 2003, *Informe del Secretario General sobre la Crisis de seguridad vial en el mundo*, Nueva York.

- ONU 2005, *Informe del Secretario General sobre la Crisis de seguridad vial en el mundo: progresos en la aplicación de la resolución 58/289 de la Asamblea General*, Nueva York.
- Pacejka, H.B. 2002, *Tire and Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, EEUU.
- Pottinger, M. 1990, "Tire/Vehicle Pull: An Introduction Emphasizing Plysteer Effects", *Tire Science and Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 170-190.
- RACE & Goodyear 2010, *Informe: El estado de los neumáticos en España*, Dirección de Comunicación RACE, Madrid.
- Rajamani, R. 2006, *Vehicle dynamics and control*, 1st edn, Springer, EEUU.
- Rechnitzer, G., Haworth, N. & Kowadlo, N. 2000, *The Effect of Vehicle Roadworthiness on crash incidence and severity*, Monash University Accident Research Centre, Australia.
- Reimpell, J., Stoll, H. & Betzler, J.W. 2000a, "Tyres and wheels" in *The Automotive Chassis (Second Edition)* Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 86-148.
- Reimpell, J., Stoll, H. & Betzler, J.W. 2000b, "Wheel travel and elastokinematics" in *The Automotive Chassis (Second Edition)* Butterworth-Heinemann, Oxford, pp. 149-265.
- Remling, J. 1978, *Steering and Suspension*, Wiley, EEUU.
- Reuter, M. & Ullmann, S. 2008, "Dynamic Steering - Aerospace Technology in Vehicle Application", *ATZ Auto Technology*, vol. 8, no. 7, pp. 32-37.
- SAE 1976, "Surface vehicle recommended practice - Vehicle dynamics terminology-SAE J670e", .
- SAE 1998, *Developments in tire, wheel, steering and suspension technology*, SP-1338 edn, Society of Automotive Engineers, EEUU.
- Skinner, R.L. 1924, *Vehicle wheel gauge*, United States Patent and Trademark Office, EEUU.
- Smith, N.D. 2004, *Understanding Parameters Influencing Tire Modeling*, Department of Mechanical Engineering, Colorado State University, EEUU.
- Sohn, H.S. & Park, T.W. 2004, "The process control and robust design for the reduction of vehicle drift and brake pulling", *International Journal of Vehicle Design*, vol. 34, no. 2, pp. 126-141.

- SWOV 2009, *Periodic Vehicle Inspection of cars*, Institute for Road Safety Research, Holanda.
- van Schoor, O., van Niekerk, J.L. & Grobbelaar, B. 2001, "Mechanical failures as a contributing cause to motor vehicle accidents - South Africa", *Accident Analysis and Prevention*, vol. 33, no. 6, pp. 713-721.
- Wei, D., Li, K., Wang, X., et al 2005, "Research on the precise calculation and control strategy of front wheel toe-in of vehicles", *Vehicular Electronics and Safety, 2005. IEEE International Conference on*, , pp. 12.
- Wong, J.Y. 1993, *Theory of grounds vehicles*, John Wiley, EEUU.
- Xu, A. & Qiao, X.M. 2005, "Measurement and analysis of statistical feature on vehicle front wheel side slip", *ISTM/2005: 6th International Symposium on Test and Measurement, Vols 1-9, Conference Proceedings*, , ed. T.D. Wen, International Academic Publishers LTD, Hong Kong, pp. 9240.
- Yamazaki, S., Fujikawa, T., Hasegawa, A., et al 1989, "Indoor test procedures for evaluation of tire treadwear and influence of suspension alignment", *Tire Science and Technology*, vol. 17, no. 4, pp. 236-273.
- Yih, P. 2005, *Steer-by-wire: Implications for vehicle handling and safety*, Ph.D. Thesis. Department of Mechanical Engineering, Stanford University, EEUU.